



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Empleo de Mallado Adaptativo en Simulaciones de Procesos de Conformado de Chapa por el Método de los Elementos Finitos

Autor: Ricardo Durnes Delgado

Tutor: Alejandro Quesada González

Leganés, diciembre de 2010

Título: **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Autor:

Director:

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ____ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Agradezco a Carolina Álvarez y Alejandro Quesada de Ingeniería Mecánica las horas que han sacrificado de su trabajo diario para ayudarme a realizar este proyecto. Considero que en este tipo de trabajos no sólo es necesario el conocimiento técnico, sino también el trato personal y en ambos aspectos puedo calificarlos de sobresalientes. Muchas gracias.

Independientemente de la realización de este proyecto, quiero agradecer a mi familia que me hayan ayudado en todo para llegar a este momento de mi vida. Gracias a ellos he podido llegar al punto de realizar este proyecto para conseguir mi carrera que me ayudará para el resto de mi vida. Realmente les debo todo a ellos.

También quiero dar las gracias a todas las personas que de manera indirecta han influido para que este proyecto se lleve a cabo.

Índice general

1. Introducción y Objetivos.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Fases del desarrollo	3
1.4 Estructura de la memoria.....	3
1.5 Trabajos anteriores	3
2. Procesos de Conformado por Deformación Plástica	5
2.1 Introducción	6
2.2 Deformación Permanente.....	6
2.3 Curva de ensayo de tracción.....	7
2.4 Trabajo de Deformación.....	10
2.5 Elaboración de piezas mediante deformación del material.....	11
2.5.1 Colada continua.....	12
2.5.1 Laminación.....	13
2.5.2 Extrusión	18
2.5.4 Plegado	24
2.5.5 Embutición	29
3. Método de los Elementos Finitos	40
3.1 Diseño y Análisis mediante programa de AEF	41
3.2 Visión General de ANSYS.....	42
3.3 El Método de los Elementos Finitos (MEF).....	42
4. Planteamiento del Proyecto.....	44
4.1 Objetivo	45
4.2 Descripción general del proyecto	45
4.2.1 Embutición	45
4.2.2 Estampación	48
4.3 LS/DYNA vs. ANSYS.....	53
4.4 La adaptatividad	54
5. Desarrollo del Proyecto	60
5.1 Introducción	61
5.2 Construcción del Modelo	62
5.3 Generación de la Geometría.....	62
5.4 Selección de los tipos de elementos	62
5.5 Introducción de las constantes reales	64
5.6 Selección de las propiedades del material.....	65
5.7 Modelado.....	66
5.8 Mallado.....	66
5.9 Contacto entre superficies	67

5.10 Imposición de coacciones.....	69
5.11 Imposición de cargas	70
5.12 Control de tiempo y de salida de datos	72
5.13 Mallado adaptativo	73
5.14 Salvar base de datos y resolver	76
5.15 Vista de Resultados	77
 6. Simulaciones	 78
6.1 Simulación del Proceso de Embutición.....	79
6.1.1 Método del Mallado Fino.....	79
6.1.2 Código del Mallado Fino.....	79
6.1.3 Comentario del Código	85
6.1.4 Método del Mallado Adaptativo.....	94
6.1.5 Resultados del Mallado Fino.....	100
6.2 Simulación del Proceso de Estampación.....	107
6.2.1 Desarrollo del Proyecto de Estampación (PASO_0).....	107
6.2.2 Resultados del Proyecto de Estampación (PASO_0)	126
6.2.3 Desarrollo del Proyecto de Estampación (PASO_1).....	137
6.2.4 Resultados del Proyecto de Estampación (PASO_1)	142
6.2.5 Simulación del PASO_0 y PASO_1 juntos.....	144
6.2.6 Resultados gráficos del PASO_0 y PASO_1 juntos	147
6.2.7 Resultados numéricos del PASO_0 y PASO_1 juntos.....	152
6.2.8 Análisis de Resultados	157
 7. Conclusiones	 159
7.1 Conclusiones	160
7.2 Conclusiones para trabajos futuros	162
 8. Presupuesto.....	 164

Índice de Figuras

Figura 2.1– Diagrama tensión – deformación	8
Figura 2.2– Colada continua.....	13
Figura 2.3– Tren de laminación.....	14
Figura 2.4 – Productos semielaborados	15
Figura 2.5– Perfiles laminados comerciales.....	17
Figura 2.6– Descripción de una extrusora simple.....	19
Figura 2.7– Métodos de extrusión	19
Figura 2.8– Gráfica carga-movimiento para una extrusión simple	20
Figura 2.9– Esquema del flujo y la fuerza en un proceso de extrusión.....	21
Figura 2.10– Sección a través del contenedor y dado de bloque de una prensa vertical para cable.....	22
Figura 2.11– Gráfica carga - movimiento para una prensa vertical.....	23
Figura 2.12 – Ejemplos de extrusión	23
Figura 2.13 – Gráfica Fuerza-ángulo de plegado	25
Figura 2.14– Esquema de Plegado a Fondo.....	26
Figura 2.15– Esquema de Plegado parcial.....	27
Figura 2.16– Esquema de Estampado/Acuñado	28
Figura 2.17– Embutido de una etapa con aprieta-chapa	29
Figura 2.18– Diferentes fases del proceso de embutición de una pieza	31
Figura 2.19– Fórmulas para el tamaño del recorte inicial	32
Figura 2.20 – Embutición simple con un amortiguador	33
Figura 2.21– Pieza Embutida mostrando la dirección del desplazamiento del material durante el proceso	33
Figura 2.22– Embutición con prensa de doble efecto.....	34
Figura 2.23– Embutición con punzón telescópico.....	35
Figura 2.24– Embutición inversa.....	35
Figura 2.25– Proceso de repujado.....	36
Fig. 2.26– Prensa de disco o de chapa	37
Figura 2.27– Matriz con chaflanes	37
Figura 2.28– Consideraciones tomadas para las herramientas de embutido telescópico	38
Figura 2.29– Detalles de radio y achaflanado en una matriz.....	38
Figura 2.30– Detalles de resalte o talón de la matriz.....	39
Figura 2.31– Detalles de resalte o talón de la matriz.....	39
Figura 3.1– Esquema de ahorro de tiempo con AEF	41
Figura 4.1– Chapa utilizada en la simulación.....	46
Figura 4.2– Punzón utilizado en la simulación.....	46
Figura 4.3– Matriz utilizada en la simulación	47
Figura 4.4– Punzón utilizado en la simulación.....	48
Figura 4.5– Pisa utilizado en la simulación	48
Figura 4.6– Placa utilizada en la simulación	49
Figura 4.7– Matriz utilizada en la simulación	49
Figura 4.8– Punzón utilizado en la simulación.....	50

Figura 4.9– Pisa extra utilizada en la simulación	50
Figura 4.10– Pisa punzón utilizado en la simulación	51
Figura 4.11– Matriz utilizada en la simulación	51
Figura 4.12– Pisa matriz utilizada en la simulación	52
Figura 4.13– Pieza final si se hicieran todas las etapas	55
Figura 4.14– Cálculos en el primer nivel de adaptatividad sobre la sección de una estructura con elementos cuadrados	55
Figura 4.15 – Forma final de una chapa deformada con 4315 elementos en la malla.....	55
Figura 4.16– Fisión de elemento cuadrilátero	56
Figura 4.17– Fisión de un elemento triangular	56
Figura 4.18– Elemento cuadrilátero fisionado en el cuarto nivel	57
Figura 4.19– El parámetro de entrada, ADPASSS, controla dentro de LS-DYNA, guardar una copia y repite los cálculos después de un refinamiento adaptativo	59
Figura 5.1– Elemento Shell 163	63
Figura 5.2– Puntos de integración	64
Figura 6.1– Sistema de montaje completo.....	100
Figura 6.2– Mallado adaptativo en el paso 1º.....	101
Figura 6.3– Mallado adaptativo en el paso 2º.....	103
Figura 6.4– Mallado adaptativo en el paso 3º.....	104
Figura 6.5– Mallado adaptativo en el paso 4º.....	105
Figura 6.6– Mallado adaptativo en el paso 5º.....	106
Figura 6.7– Elección del directorio para guardar datos de la simulación.....	107
Figura 6.8– Aspecto del programa al iniciarlo.	108
Figura 6.9– Selección del modo de resolución.....	109
Figura 6.10– Conjunto del paso_0.....	110
Figura 6.11– Tipología del material más óptimo para la simulación	111
Figura 6.12– Espesor del material 1 (todos excepto la chapa)	111
Figura 6.13– Definición del modelo de los materiales	112
Figura 6.14– Definición del modelo del material para la chapa	113
Figura 6.15– Definición de las propiedades la chapa.	113
Figura 6.16– Elección de material rígido.....	114
Figura 6.17– Definición de las propiedades de los materiales rígidos.	114
Figura 6.18– Cuadro de mando para el mallado de los diferente mallados.....	115
Figura 6.19– Cuadro de mando para la selección los elementos.....	116
Figura 6.20– Cuadro de mando para la selección las áreas	117
Figura 6.21– Asignación de los nombres a cada componente.....	117
Figura 6.22– Creación de partes.	118
Figura 6.23– Ventana automática que nos muestra las parts.....	118
Figura 6.24– Definición de contactos	119
Figura 6.25– Creación de los vectores de movimiento (definición).....	120
Figura 6.26– Creación de los vectores de movimiento (coordenadas).	120
Figura 6.27– Definición de cargas.....	121
Figura 6.28– Mallado Adaptativo.....	122
Figura 6.29– Parametrización del mallado adaptativo.....	123
Figura 6.30– Tiempo de simulación.	124
Figura 6.31– Control de salida de datos.	124

Figura 6.32– Ajuste de escala.	125
Figura 6.33– Barra para introducir el código directamente.	126
Figura 6.34– Elección de los archivos de resultados para ver la solución.	127
Figura 6.35– Selección para leer los substeps.	127
Figura 6.36– Opciones para ver los resultados	128
Figura 6.37– Mallado adaptativo en el paso 1º.	129
Figura 6.38– Mallado adaptativo en el paso 2º.	130
Figura 6.39– Mallado adaptativo en el paso 3º.	131
Figura 6.40– Mallado adaptativo en el paso 4º.	132
Figura 6.41– Mallado adaptativo en el paso 5º.	133
Figura 6.42– Mallado adaptativo en el paso 6º.	134
Figura 6.43– Mallado adaptativo en el paso 7º.	135
Figura 6.44– Criterio de Von Misses.	136
Figura 6.45– Opciones de Restart.	137
Figura 6.46– Selección de part para que tenga las tensiones del paso anterior. ...	140
Figura 6.47– Conjunto representado por parts.	146
Figura 6.48– Mallado en el 1º paso.	147
Figura 6.49– Von Misses en el paso 1º.	147
Figura 6.50– Mallado en el 2º paso.	148
Figura 6.51– Mallado en el 2º paso.	148
Figura 6.52– Mallado en el 3º paso.	149
Figura 6.53– Mallado en el 3º paso.	149
Figura 6.54– Mallado en el 4º paso.	150
Figura 6.55– Mallado en el 4º paso.	150
Figura 6.56– Mallado en el 5º paso.	151
Figura 6.57– Mallado en el 5º paso.	151
Figura 6.58– Forma final vista de perfil.	152
Figura 6.59– Pieza dividida en función de desplazamiento de sus nodos.	153
Figura 6.60– Placa dividida en tramos la parte de mayor densidad de mallado.	153
Figura 6.61– Puntos utilizados para calcular la profundidad de estampación.	156
Figura 6.62– Posición de los nodos en las placas real y simulada.	156

Índice de Tablas

Tabla 1– Tabla de tipo de cargas	70
Tabla 2– Desplazamiento del punzón en la embutición	71
Tabla 3– Desplazamiento del punzón en el primer paso de la estampación.....	71
Tabla 4– Comentario del código.....	85
Tabla 5– Comentario del código para el mallado adaptativo	99
Tabla 6– Substeps en el paso 1º.....	102
Tabla 7– Substeps en el paso 2º.....	103
Tabla 8– Substeps en el paso 3º.....	104
Tabla 9– Substeps en el paso 4º.....	105
Tabla 10– Substeps en el paso 5º.....	106
Tabla 11–Resumen de los materiales para el paso_0.	115
Tabla 12– Tabla con los parámetros de mallado adaptativo.....	122
Tabla 13– Substeps en el paso 1º.....	129
Tabla 14– Substeps en el paso 2º.....	130
Tabla 15– Substeps en el paso 3º.....	131
Tabla 16– Substeps en el paso 4º.....	132
Tabla 17– Substeps en el paso 5º.....	133
Tabla 18– Substeps en el paso 6º.....	134
Tabla 19– Substeps en el paso 7º.....	135
Tabla 20–Resumen de los materiales del paso_1.	139
Tabla 21–Resumen las parts y los tipos de carga.	139
Tabla 22–Resumen de partes para el paso_0 y paso_0 juntos.....	144
Tabla 23–Posición de los nodos para la placa simulada con mallado adaptativo.	155
Tabla 24–Posición de los nodos para la placa simulada sin mallado adaptativo..	156
Tabla 25– Posición en el eje Z de puntos de la placa en función de su coordenada X.....	157
Tabla 26–Profundidad de la estampación.....	158

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Hay varios proyectos [1] [2] en la universidad que explican el funcionamiento de LS-DYNA pero ninguno contempla el mallado adaptativo. Por ello se vio la necesidad de explicar este aspecto ya que los beneficios de su uso son bastante notables. El proyecto pretende explicar detalladamente cómo se utiliza el mallado adaptativo en LS-DYNA. Como ya se sabe, LS-DYNA permite hacer análisis explícitos. Para ello, se realizarán varias simulaciones de procesos reales. Algunas serán simulaciones de embutición y otras de estampación. El primero, se argumenta desde un modo más técnico, ya que la explicación del proceso se realiza con una exposición del código de comandos que genera ANSYS al trabajar con su interfaz. El proceso de estampación, se hace desde un modo más didáctico, y se explica directamente con la interfaz de ANSYS. Con estas simulaciones queda bien explicado cómo se diseña y cómo se aplica el **mallado adaptativo**.

Durante el proyecto, se explica detalladamente en qué consiste el *mallado adaptativo* y para qué se usa. A pesar de eso, se puede hacer una introducción de las necesidades diciendo que, la mayoría de las simulaciones de este tipo se hacen realizando un mallado con un grado de finura según la zona en la que se va a necesitar mayor precisión. Para ello, en primer lugar, se hace un pequeño estudio de qué zonas de las piezas van a necesitar grado más fino y luego se malla en función de estas consideraciones previas. Pues bien, el mallado adaptativo agiliza estos procesos realizando ese mallado adaptativo automáticamente durante el proceso en las zonas en las que considera necesarias esas adaptaciones. El mallado adaptativo, se puede optimizar parametrizando opciones del mallado que se detallaran más tarde. El resto del proceso se realiza igual que si se hiciese con un mallado fino excepto a la hora de leer los resultados. Cuando se hace este mallado más complejo, se crean unos archivos con extensión *.RSnn* y que habrá que saber interpretarlos porque cada uno contiene la solución con un grado de mallado distinto.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es conseguir un código de ANSYS capaz de simular un proceso de embutición simple y otro de estampación (varias etapas) con bastante más complejidad. Estos dos procesos de conformado se realizaran de dos formas diferentes. La diferencia dentro de cada proceso será el método de mallado de la placa objeto de estudio. Serán los siguientes:

- Mallado fino de la placa
- Mallado adaptativo en la placa

Para el primer caso, partiremos de los proyectos realizados anteriormente por los otros alumnos aunque de una forma más optimizada. Para el segundo caso, se seguirá partiendo de otros pero sólo a modo de orientación porque a lo largo del nuestro se podrá ver que hay que cambiar el esquema del código debido a las limitaciones que tiene el uso del *mallado adaptativo*.

Para todo ello, se utilizará la característica que permite realizar la simulación usando el entorno gráfico como interfaz mientras que el propio ANSYS genera el código de simulación en formato texto. Para la embutición se utilizará más el código de comandos y que se expondrá más tarde. Para la estampación se utilizará el entorno gráfico de la interfaz de ANSYS aunque hay secciones en las que es más fácil interaccionar directamente con el código de comandos (en los array)

Todo este proceso de mallado adaptativo, se ha visto la necesidad de ejecutarlo para ahorrar tiempo. Esto se va a poder hacer de varias formas que se contemplan a continuación:

- En una simulación con mallado adaptativo la densidad de malla se ajusta de manera automática a la vez que el solver resuelve el problema, por lo que no es necesario hacer pruebas de mallado que alargan la fase de modelización. Sin mallado adaptativo, puede suceder que se construya un modelo que no de resultados aceptables tras la solución por insuficiente densidad de malla, lo que obliga a descartar los resultados, remallar y relanzar la simulación.
- En ocasiones la densidad de mallado está optimizada para el cálculo de las primeras etapas de estampación, pero resulta deficiente para etapas posteriores. Como no se puede modificar la malla en una operación de restart, es obligatorio refinarla en la primera etapa y recalcular desde el principio.
- Al no necesitar optimizar desde el principio la malla para que todas las etapas se calculen correctamente, el mallado adaptativo permite calcular las primeras etapas de estampación con una malla sensiblemente más grosera que recorta notablemente los tiempos de cálculo.

1.3 Estructura de la memoria

El proyecto está dividido en varios capítulos. Los primeros son introductorios de los procesos de conformado y del método de los elementos finitos. Los siguientes, son del planteamiento de las simulaciones que se harán y de explicación de cómo se utiliza la herramienta de ANSYS/LS-DYNA. Los últimos serán la parte del proyecto donde se puede ver el desarrollo completo de los trabajos de embutición y estampación. Se muestra desde cómo se fabrican los modelos con los códigos hasta los resultados

proporcionados por las simulaciones. Se interpretarán esos resultados y se se sacarán conclusiones tanto de las simulaciones como de todo el proyecto.

1.4 Trabajos anteriores

Se han realizado varios trabajos relacionados con procesos de simulación en LS-DYNA pero éste es el primero que se hace de este tipo.

Los anteriores trabajos realizaban varias simulaciones de procesos de embutición y estampación. Utilizaban el método del mallado fino que consiste en mallar la placa en función de la necesidad. Es decir, el grado de finura de la malla dependía de la precisión de los resultados. También se recurría al método de dividir la placa base en varias partes para darle mallados diferentes. Este grado de mallado dependía de dónde se producían más esfuerzos y deformaciones. Por tanto, en las zonas de mayor esfuerzo y de mayores deformaciones se mallaba con un grado de finura bastante superior que las zonas que no lo necesitaban.

Todo esto hacía que el tiempo de cálculo y de diseño fuese bastante grande por lo que se recurrió a utilizar una opción que se encuentra en LS-DYNA y que cuando se sabe manejar, se consiguen resultados bastante óptimos. La opción es la “Mallado Adaptativo” y nos ahorra tiempo tanto en el diseño como en el cálculo de los resultados. Tiempo en el diseño porque no hay que dividir la placa en varias partes si no que lo hace directamente el programa dependiendo de la precisión que se necesita. Después de calcular algunas etapas de diferentes proyectos con los mismos troqueles y movimientos, se puede ver perfectamente que el tiempo de cálculo se reduce en más de un 90 % por lo que a la hora de calcular un proyecto de gran envergadura, podría ahorrar algunos costes.

Capítulo 2

Procesos de conformado por deformación plástica

2.1 Introducción

El conformado por deformación plástica es el proceso más antiguo para la fabricación de piezas metálicas. El notable desarrollo tecnológico que han sufrido estos procesos hasta la actualidad, permite disponer de una amplia variedad de técnicas adaptadas para las distintas aplicaciones, que abarcan desde productos que sirven como materia prima para otros procesos de fabricación hasta como componentes finales.

2.2 Deformación permanente en metales

El enlace metálico que une los átomos con orbitales d tienen los electrones de estos orbitales compartidos por los distintos núcleos, circulando libremente a través de todo el material. [6]

La temperatura del material afecta a la distancia media existente en los átomos: A mayor temperatura, mayor será la amplitud de la vibración de los átomos y, por lo tanto, mayor distancia entre ellos.

La forma de los átomos y la distancia entre ellos hacen que el metal cristalice de una manera característica. El aluminio cristaliza cúbico centrado en caras, el titanio y el zinc cristaliza en hexagonal compacto, el hierro y el cobalto tienen formas alotrópicas, es decir, dependiendo de la temperatura cristalizan en cúbico centrado en cuerpo a temperatura ambiente y cúbico centrado en caras a altas temperaturas.

Según la forma de cristalizar, el metal tendrá unos planos característicos de deslizamiento. Procesos de conformado por deformación plástica caras seguido del centrado en cuerpo y por último el hexagonal que sólo tiene un plano de deslizamiento.

Un metal está formado por granos microscópicos, cada uno de los cuales es un cristal con miles de átomos y con una orientación determinada. La distinta orientación de los granos cuyo conglomerado forma el metal hace que el material tenga un comportamiento isotrópico a escala macroscópica.

Al deformar el metal siempre se encontrarán granos con planos cristalográficos orientados en la dirección del cortante máximo que se deformarán permanentemente, mientras que los que no lo están rotarán hasta que se encuentren en la dirección para deformarse. Esto hace que el metal deformado esté internamente muy distorsionado, y los granos deformados aumenten sus imperfecciones cristalinas (dislocaciones). Se dice entonces que el material posee acritud.

Esta acritud hace que localmente muchas partículas se encuentren tensionadas, aunque globalmente el material se encuentre en equilibrio, son las *tensiones residuales*.

Otro efecto de la acritud es el aumento de resistencia a la deformación permanente que se produce (endurecimiento), y la disminución de capacidad de deformación antes de la rotura (fragilización).

La acritud se puede eliminar manteniendo el metal a alta temperatura durante largo tiempo. Este aumento de temperatura aumenta la vibración de los átomos permitiendo una más rápida recolocación y reorganización de los átomos y granos (re-cristalización), aliviando las tensiones residuales. Este tratamiento térmico suele conocerse como recocido, o revenido.

Una característica propia del material es su temperatura de re-cristalización, definida como la temperatura a la cual el material alivia un 95% de sus tensiones residuales en una hora. Esta temperatura varía con la composición de la aleación, la cantidad de deformación (acritud) y con las transformaciones de fase que tengan que ocurrir. Esta re-cristalización se realiza en tres fases: Difusión de defectos cristalinos (cristalitas), alivio de tensiones, y crecimiento de grano (éste hace decrecer la resistencia del material). Habitualmente se estima que esta temperatura se encuentra entre un medio y un tercio de la temperatura de fusión.

2.3 Curva del ensayo de tracción

Un ensayo típico para la estimación de las propiedades plásticas de un material es el «Ensayo de tracción». Este ensayo consiste en estirar una probeta a una velocidad constante registrando la resistencia (fuerza) que opone al estiramiento. De aquí se obtiene una curva fuerza-incremento de longitud. La curva que habitualmente (Fig.-2.1) se usa, es la fuerza dividida el área de la sección inicial de la probeta frente al incremento de longitud dividido por la longitud inicial de la probeta. [10]

A uno y otro valor se le denomina tensión nominal s y deformación nominal e respectivamente.

Las tensiones y deformaciones nominales están referidas a valores geométricos iniciales, pero la tensión real depende del área actual que soporta la carga y la deformación real depende de la historia de las distintas deformaciones a las que ha sido sometida la probeta. Para relacionar los valores nominales con los reales se parte de la hipótesis de conservación de volumen durante los procesos de deformación.

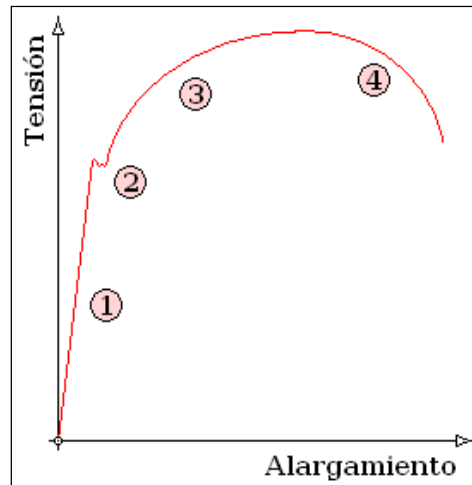


Figura 2.1– Diagrama tensión - deformación

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas:

1. Deformaciones elásticas

En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina *módulo de elasticidad* o *de Young* y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

2. Fluencia o cedencia

Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a

lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

3. Deformaciones plásticas

Si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica.

4. Estricción

Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

Esta hipótesis parte de que la densidad del material no cambia y por lo tanto el producto del área por la longitud en cualquier instante es igual al producto entre valores iniciales: [6]

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$$

Por lo tanto la tensión real será:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P \cdot A_0}{A_0 \cdot A} = s \cdot (1 + e)$$

Del mismo como se procede con la deformación real.

$$\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + e)$$

El uso de la deformación real tiene la ventaja adicional de que sus valores son aditivos.

Otro valor interesante es la velocidad de deformación en función de la velocidad lineal, ya que de este factor depende la curva de tracción en materiales deformados en caliente.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{l}{l_0} = \frac{v}{l_0}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\ln \frac{l}{l_0}}{t} = \frac{v}{l}$$

2.4 Trabajo de deformación

Para el cálculo de fuerzas y potencias de proceso, el método más simple es mediante la obtención del trabajo de deformación homogénea. En el cual se calcula la deformación sufrida por el material considerando el estado final de éste, y a partir de la energía necesaria para llevar a cabo esta deformación, se mayor la energía necesaria multiplicándolo por factores que estimen la fricción y la irreversibilidad (redundancia) del proceso.

$$dW = P \cdot \partial l = \sigma \cdot A \cdot \partial l = V \cdot \sigma \cdot \partial \epsilon$$

Si el material sigue la ley exponencial.

$$\frac{W}{V} = \int_0^{\epsilon_f} C \cdot \epsilon^n \cdot d\epsilon = \frac{C}{n+1} \cdot \epsilon^{n+1}$$

2.5 Elaboración de piezas por deformación del material

- Se puede realizar a temperatura ambiente (**deformación en frío**) o elevando la temperatura del material (**deformación en caliente**).
- Se aplica principalmente a los *metales*, aunque también se emplea en la obtención de piezas de *plástico* (termo-conformado).
- Algunos metales (Au, Cu, Ag) se deforman bien en frío, pero otros (materiales férricos) son difíciles de deformar en frío. A poder ser se elige la deformación en frío, siempre que el material y la pieza lo aguanten, pues se obtienen unas propiedades mecánicas superiores y un mejor acabado de la pieza. Además se ahorra energía al no tener que calentar el material y las herramientas a emplear no tienen que soportar grandes temperaturas. Por el contrario, las máquinas empleadas en la deformación en frío han de ser más potentes.

Una *clasificación* de algunos diferentes métodos y operaciones por deformación puede ser:

- **En caliente**
 - Colada continua
 - Laminación
 - Forja
 - Estirado
 - Recalcado
 - Estampado
 - Extrusión

- **En frío**
 - Laminación
 - Forja
 - Estampación
 - Extrusión
 - Doblado y curvado
 - Embutición
 - Trefilado y estirado

2.5.1 Colada continua

Consiste en llenar un *recipiente* (cuba) con metal fundido procedente de un horno empleado para obtener acero. El metal cae de la cuba y se introduce en un *molde refrigerado* sin fondo donde se solidifica y se obtiene así una tira continua (perfil) de sección semejante a la del molde.

Esta tira cae en vertical y al apoyarse sobre unos cilindros, a medida que avanza, se va colocando horizontal hasta ser cortada mediante sopletes, que se mueven a la misma velocidad que la plancha.

A continuación se laminan los perfiles, aprovechando su alta temperatura.

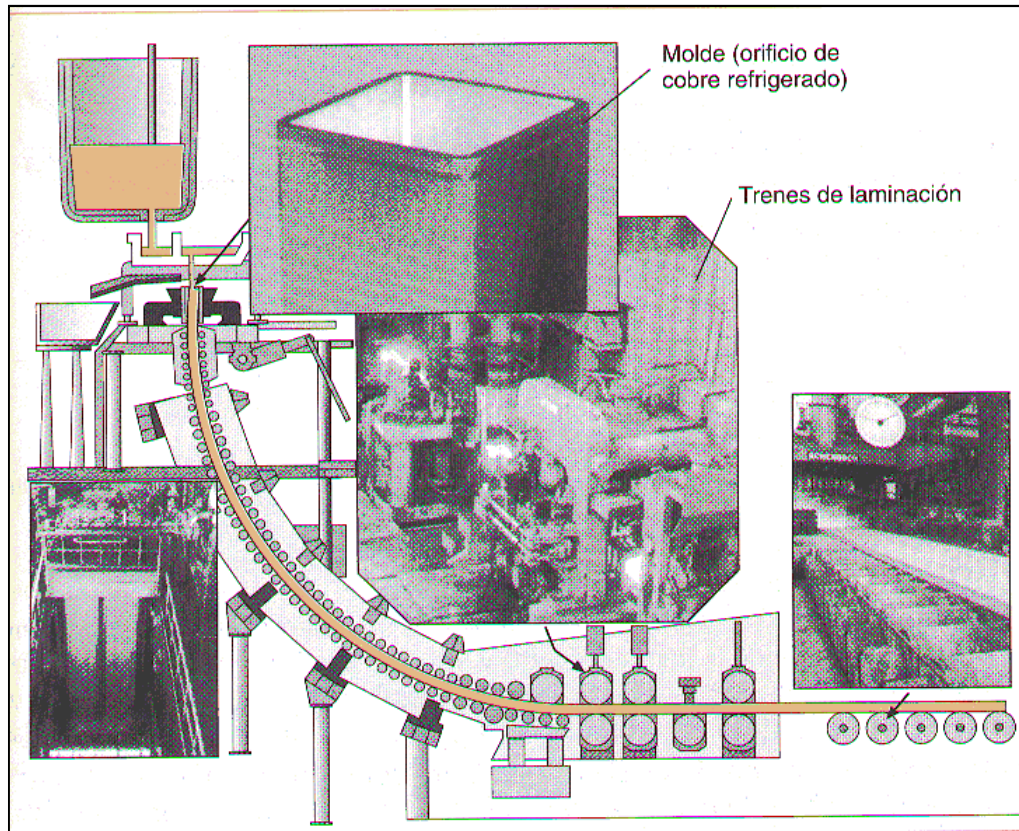


Figura 2.2– Colada continua.

2.5.2 Laminación

Es un procedimiento que consiste en modificar una masa metálica haciéndola pasar entre rodillos superpuestos, que giran en sentido opuesto.

Se efectúa normalmente *en caliente*; sin embargo, existe la laminación *en frío*. En la laminación en frío los metales adquieren *acritud* al deformarse, por lo que se someten a un *tratamiento de recocido* al final de la operación, e incluso en una etapa intermedia.

Nota.- *Acritud*: modificación de las propiedades de plasticidad y tenacidad de los metales, que se produce cuando se han sometido a alguna deformación permanente.

2.5.2.1 Tren de laminación

Es una agrupación de varios laminadores o cajas relacionadas entre sí, de modo que el material a laminar pasa sucesivamente por cada una, hasta completar el ciclo de elaboración.

Un laminador elemental estaría constituido por las siguientes partes: dos o más *cilindros*, normalmente horizontales; un *bastidor* que soporta las *ampuestas* o asientos de los cilindros; y un sistema de ajuste de los cilindros formado por espárragos roscados, llamados *tornillos de presión*. Todo el conjunto recibe el nombre de *caja de laminación*.

Además del modelo elemental de dos cilindros, existen numerosas variantes, tanto en el número como en la situación de los mismos: *dúo*, *trío*, *doble dúo*, *cuarto*, *múltiple*, *universal*.

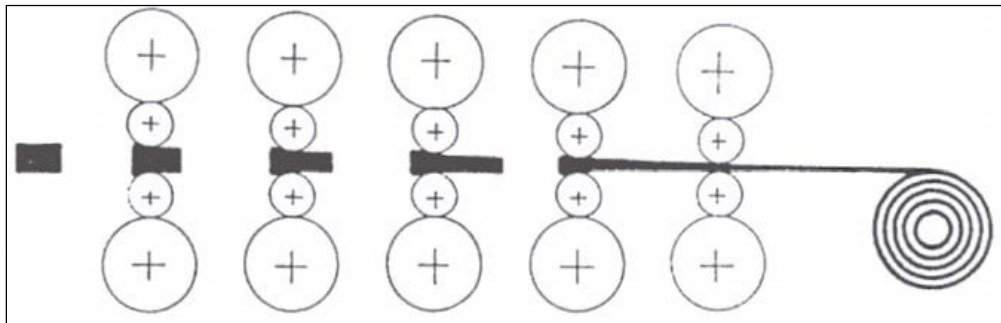


Figura 2.3– Tren de laminación.

2.5.2.2 Formas comerciales de los perfiles laminados

Por medio del laminado se transforman los lingotes metálicos en *productos semielaborados* comerciales, aptos para su empleo directo o para servir de base a nuevas elaboraciones (**productos acabados**).

Los materiales que se emplean en el conformado de perfiles por laminación son:

- Aceros
- Aluminios
- Latones
- Etc.

• **Productos semielaborados**

- **Desbaste:** producto de sección cuadrada o rectangular y sin aristas vivas. Grueso $h = 130 \div 340$ mm. Ancho $b = 130 \div 550$ mm. o más. UNE 36 511
- **Palanquilla:** producto de sección aproximadamente cuadrada y sin aristas vivas. Lado $b = 40 \div 125$ mm. UNE 36 513
- **Llantón:** producto de sección aproximadamente rectangular. Grueso $h = 11 \div 125$ mm. Ancho $200 \div 600$ mm. UNE 36 513

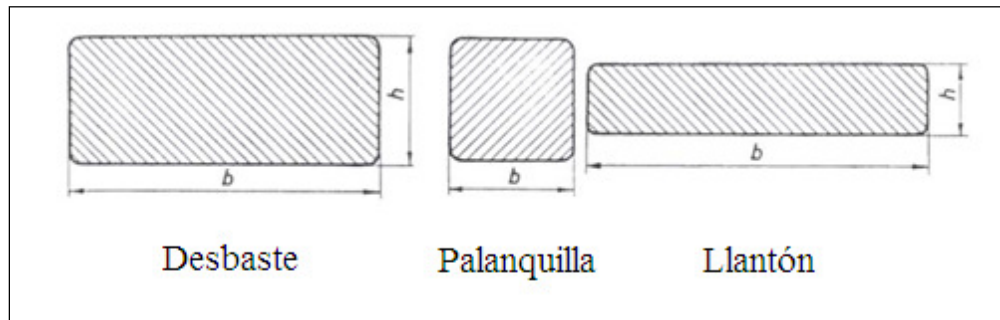


Figura 2.4 – Productos semielaborados.

• **Productos acabados**

- **Chapa:** producto plano de ancho superior a 600 mm. Puede ser:
 - Chapa gruesa: grueso ≥ 6 mm.
 - Chapa media: grueso $= 3 \div 6$ mm.
 - Chapa fina: grueso ≤ 3 mm.
- **Plano ancho:** producto de sección rectangular. Grueso $= 6 \div 20$ mm. Ancho $= 200 \div 600$ mm. UNE 36 561
- **Llanta:** producto de sección rectangular. Grueso = Ancho = .UNE 36 551
- **Pletina:** producto de sección rectangular. Grueso = Ancho = .UNE 36 552
- **Fleje:** producto de sección rectangular. Grueso = Ancho = .UNE 36 553
- **Redondo:** producto de sección circular. Su designación viene determinada por su diámetro en mm. Ejemplo: Redondo 8 UNE 36 541
- **Medio redondo:** producto de sección semicircular. Su designación viene determinada por su ancho (b) y su altura
- **Pasamano:** producto de sección inferior a un semicírculo. Su designación viene determinada por su ancho (b) y su altura o espesor (h) en mm. Ejemplo: Pasamano 30 x 8 UNE 36 544

- **Cuadrado:** producto de sección cuadrada. Su designación viene determinada por la longitud de su lado en mm. Ejemplo: Cuadrado 18 UNE 36 542
- **Hexagonal:** producto de sección hexagonal. Su designación viene determinada por su distancia entre caras en mm. Ejemplo: Hexagonal 18 UNE
- **Angular de lados iguales:** la designación se realiza por la longitud de sus alas (h) y su espesor (e) en mm. Ejemplo: L (PN) 50 x 50 x 7 UNE 36 531
- **Angular de lados desiguales:** la designación se realiza por las longitudes de sus alas (b y b1) y su espesor (e) en mm. Ejemplo: L (PN) 60 x 40 x 6 UNE 36 532
- **Perfil en U normal:** la designación se realiza por el valor h en cm. Los demás valores vienen en función de h. Ejemplo: U (PN) 12 UNE 36 522
- **Perfil en T normal:** se designa por los valores de h, b y e en mm. Los valores de h y b son iguales para un perfil en T normal. Ejemplo: T (PN) 40 x 40 x 5 UNE 36 533
- **Doble T perfil normal:** su designación viene dada por su altura h en cm. Ejemplo: I (PN) 16 UNE 36 521
- **Viga de ala ancha:** se designa por su anchura b o su altura h en mm. , ya que ambas son iguales. Ejemplo: viga de ala ancha 180 UNE 36 523. Cada día se emplea más la viga de ala ancha con alas paralelas.
- **Tubo cuadrado:** su designación viene dada por el valor de su lado exterior y su espesor en mm.
- **Tubo redondo:** su designación viene dada por el diámetro exterior y el espesor en mm.

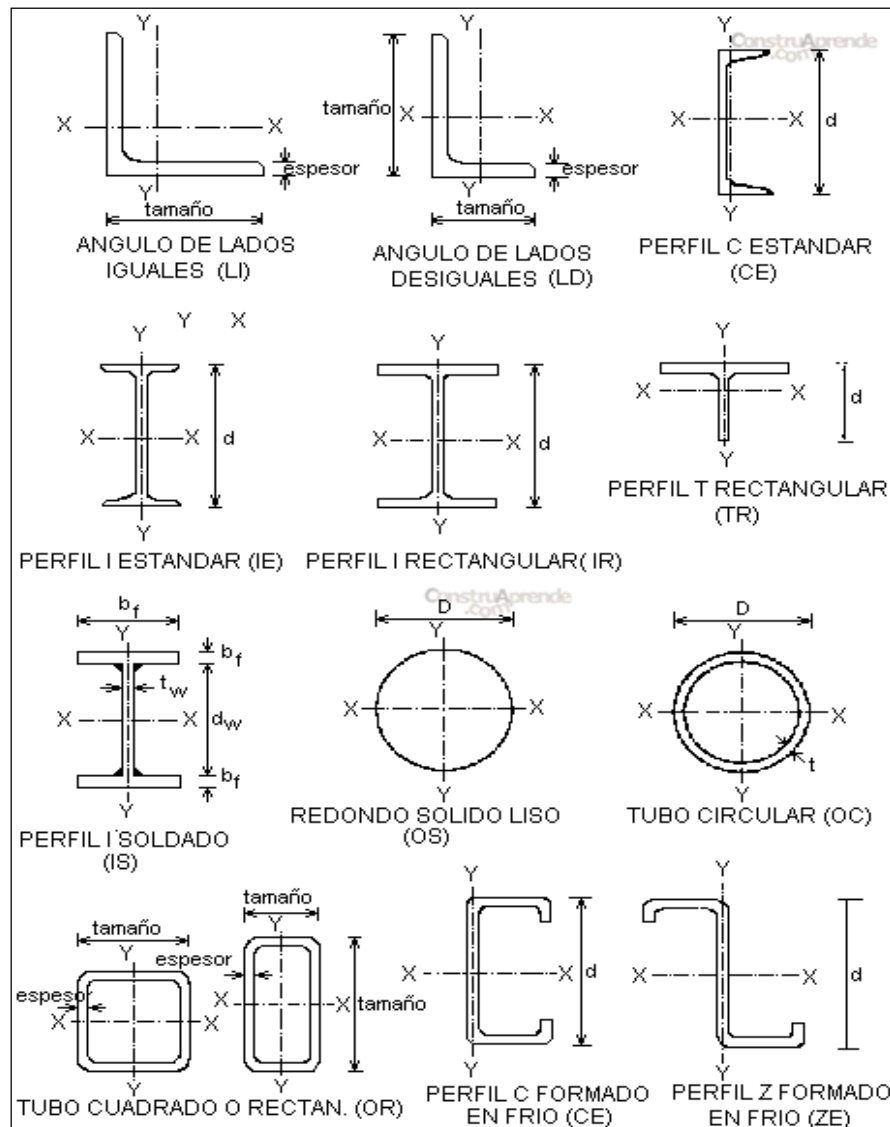


Figura 2.5– Perfiles laminados comerciales.

2.5.3 Extrusión

Los metales, los plásticos y los materiales de cerámicas se transforman en artículos útiles y productos de consumo por muchos diferentes medios. Los metales se vacían de maneras diferentes en moldes para producir formas intrincadas pequeñas o partes para máquinas en producción en serie. Los metales también se laminan entre rodillos, se conforman en piezas y se martillan en matrices o se fuerzan a través de dados por extrusión para hacer formas especiales. Por ejemplo, el hierro y el acero se calientan a temperaturas altas para poder conformarlos fácilmente por forjado (martillado y comprimido). Aunque la forja fue en un tiempo una operación para metales en caliente, en la actualidad se practica el forjado en frío aún con el acero. A temperaturas intermedias se puede producir un material metalúrgicamente superior para algunos fines. [8]

La extrusión en prensa es un procedimiento de conformación por deformación plástica, que consiste en moldear un metal, en caliente o frío, por compresión en un recipiente obturado en un extremo con una matriz o hilera que presenta un orificio con las dimensiones aproximadas del producto que se desea obtener y por el otro extremo un disco macizo, llamado disco de presión. Si el esfuerzo de compresión se transmite al metal por medio del disco de presión o de la matriz, al proceso de extrusión se le denomina extrusión *directa* o *extrusión inversa*.

2.5.3.1 Tres elementos básicos de la Extrusión

El primer elemento de la línea tiene que cumplir con tres requisitos básicos:

- Continuamente reunir la materia prima en estado sólido y fundido.
- Continuamente fundir la materia prima
- homogeneizar la materia prima térmica y físicamente.

La extrusora en general consiste en uno o dos tornillos que rotan dentro de un barril caliente. Un tornillo constituye el diseño típico para la mayoría de las aplicaciones mientras que dos tornillos son usados para compuestos y materia prima en polvo. El diseño del tornillo sigue los requisitos claves del proceso tales como la tasa de rendimiento, la calidad de la fundición y las materias primas usadas.

2.5.3.2 Proceso

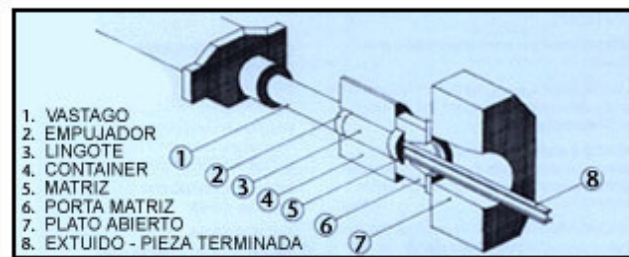


Figura 2.6– Descripción de una extrusora simple.

Este proceso de compresión indirecta es esencialmente de trabajo en caliente, donde un lingote fundido de forma cilíndrica, se coloca dentro de un fuerte contenedor de metal y comprimido por medio de un émbolo, de manera que sea expulsado a través del orificio de un dado.

El metal expulsado o extruido toma la forma del orificio del dado. El proceso puede llevarse a cabo por dos métodos llamados: extrusión directa, donde el émbolo está sobre el lingote en el lado opuesto al dado y el metal es empujado hacia el dado por el movimiento del émbolo, o extrusión indirecta, en la cual el dado y el émbolo están del mismo lado del lingote y el dado es forzado dentro del lingote, por el movimiento del émbolo.

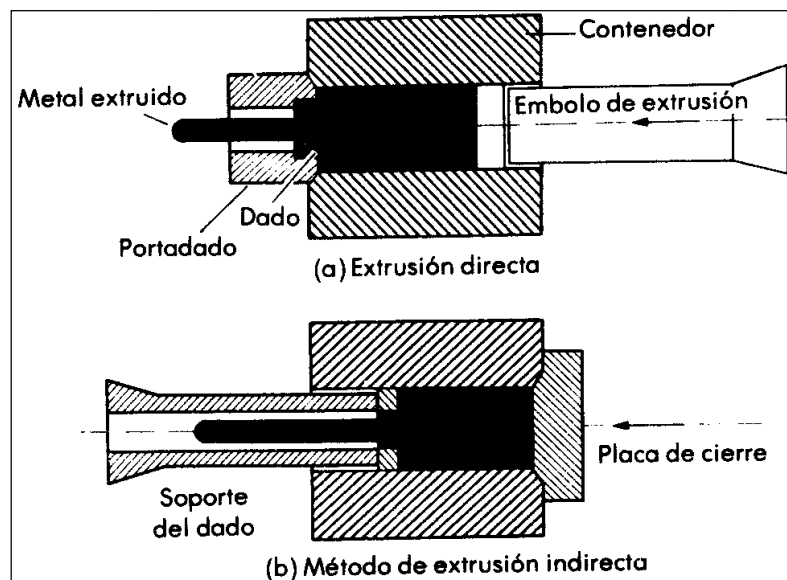


Figura 2.7– Métodos de extrusión.

La extrusión es un método relativamente nuevo en la fabricación de piezas metálicas. Originalmente fue desarrollado para la fabricación de tubo de plomo por los sistemas victorianos de agua y gas.

Los problemas del material adecuado para el dado, que soporte las temperaturas altas y presiones requeridas para extruir los metales más duros y fuertes, no fueron resueltos sino hasta bien entrado el siglo XX.

En nuestros días, es posible extruir con éxito los siguientes metales y sus aleaciones: Aluminio, cobre, plomo y acero, aunque para este último se requiere una técnica especial.

2.5.3.3 Prensa de extrusión directa

Una prensa típica para la extrusión de aleaciones de cobre, sería de alrededor de 5000 ton de capacidad de carga en el émbolo, y consistiría de una pesada placa de acero recubierta con una aleación de acero resistente al calor. Este podría acomodar un lingote de 560 mm de diámetro y 1 m de longitud. Ajustado dentro del contenedor mencionado estaría un émbolo que tenga un diámetro menor que el barreno interior del contenedor. El propósito de este claro es doble, minimizar la fricción entre el émbolo y el contenedor y también permitir una calavera de metal para ser dejada después que el lingote ha sido extruido. La razón para esta calavera de metal será explicada más adelante. Un cojincillo de presión precalentado se coloca entre el émbolo y el lingote a fin de prevenir el enfriamiento de la cola del lingote caliente desde el émbolo. El dado de extrusión está hecho de acero para una herramienta resistente al calor y la forma del orificio junto con el orificio del soporte o paralelo son cuidadosamente preparados por el operario de la caseta de dados.

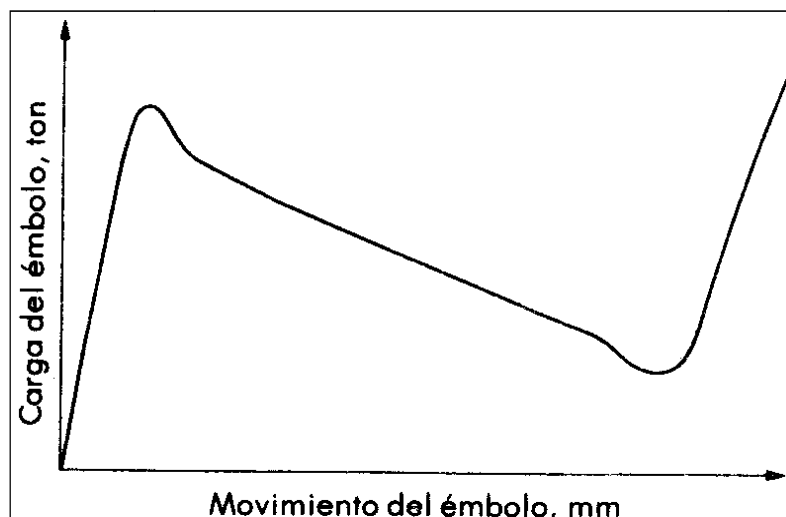


Figura 2.8– Gráfica carga-movimiento para una extrusión simple.

El lingote fundido de dimensiones apropiadas a la prensa de extrusión y el producto se calienta a la temperatura de trabajo en caliente. Como una regla aproximada ésta es de dos terceras partes de la temperatura de fusión en grados K, por ejemplo, aluminio 600 K, cobre 800 K.

El lingote calentado se coloca en el contenedor, seguido por el cojincillo de presión, caliente. El émbolo se coloca en el contenedor y se aplica la presión. Cuando se opera, el lingote es recalado y comprimido haciendo contacto por todos lados con el contenedor. Entonces incrementando la presión, el lingote es extruido a través del orificio del dado. El metal sale del dado y corre sobre una canal. Colocando celdas de carga sobre el émbolo de extrusión, es posible seguir los cambios de la carga durante el ciclo de extrusión.

La carga se eleva bruscamente, mientras el lingote está siendo recalado, pero una vez que comienza la extrusión la carga descende. La rapidez de descenso es constante hasta que se ha extruido aproximadamente el 85% del lingote, cuando ocurre un paro súbito, seguido de una elevación muy rápida hasta alcanzar la capacidad de carga de la prensa.

En este punto la extrusión debe detenerse. Esto ocurre mientras aún hay alrededor del 5 al 10% del sobrante del lingote y éste debe descartarse. La razón para esta elevación final de la carga es fácil de explicar, es la misma razón por la que es imposible extruir la última pizca de pasta de dientes del tubo. Durante las primeras etapas de la extrusión, la fuerza aplicada debe provocar que el metal fluya hacia el dado, a lo largo de una trayectoria diagonal. Al final del ciclo de extrusión, la dirección del flujo del metal, llega a ser más y más perpendicular a la línea de acción de la fuerza aplicada.

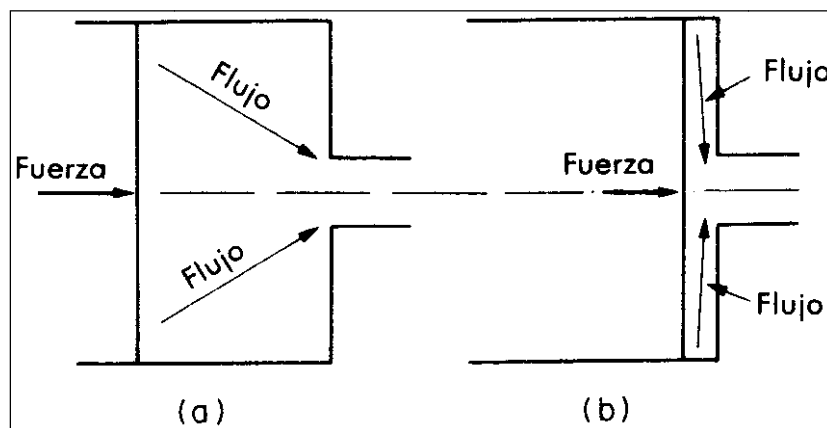


Figura 2.9– Esquema del flujo y la fuerza en un proceso de extrusión.

Las razones para las otras características del diagrama carga/movimiento del émbolo, se explicarán más adelante.

Puesto que siempre hay una pequeña cantidad de metal remanente, después que se completa la extrusión, significa que debe prevenirse la remoción del dado y expulsar el descarte.

La extrusión de cable forrado es un interesante ejemplo del proceso de extrusión directa. El metal líquido se vacía en el contenedor, el cual es enfriado por vapor que pasa a través de unos agujeros cuadrados. Se impulsa el émbolo hacia abajo hasta que hace contacto con el plomo fundido, el cual se deja solidificar antes de aplicar una mayor presión por el movimiento del émbolo. Esto está sincronizado con el movimiento de izquierda a derecha del cable y el plomo es extruido como un tubo a través del orificio anular entre el cable y el dado. Puesto que la extrusión se detiene mientras todavía hay plomo en el contenedor, la siguiente adición de metal líquido causará una fusión parcial, dejando a los óxidos flotar en la superficie y entonces la resolidificación da un lingote continuo, listo para el siguiente elemento de extrusión. De esta manera, una longitud continua de forro sin uniones puede ser producida, el cual puede ser de una longitud sin fin.

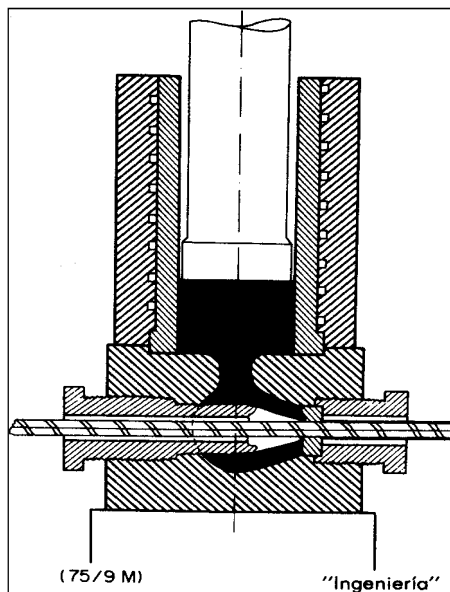


Figura 2.10– Sección a través del contenedor y dado de bloque de una prensa vertical para cable.

2.5.3.4 Prensa de extrusión invertida

El contenedor es similar a aquel del proceso de extrusión directa, excepto, que en lugar de un dado y un émbolo, en los lados opuestos del lingote hay un dado y un soporte del dado hueco en un lado del lingote. El soporte hueco del dado toma el lugar del émbolo. Esto debilita toda la prensa y limita el tamaño de la sección que puede ser producida por este proceso.

El diagrama carga/movimiento del émbolo, para esta clase de prensa se muestra en la siguiente figura:

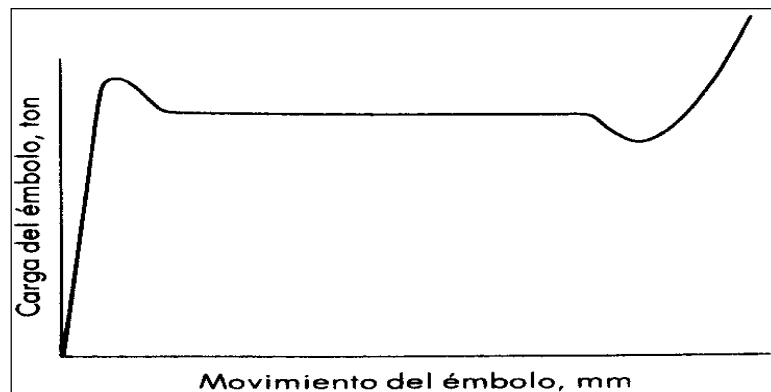


Figura 2.11– Gráfica carga - movimiento para una prensa vertical.

2.5.3.5 Algunos ejemplos de extrusión

Las secciones huecas o complejas se pueden sacar en un solo movimiento, sin soldadura ni flexión. Tienen tolerancia excelente.

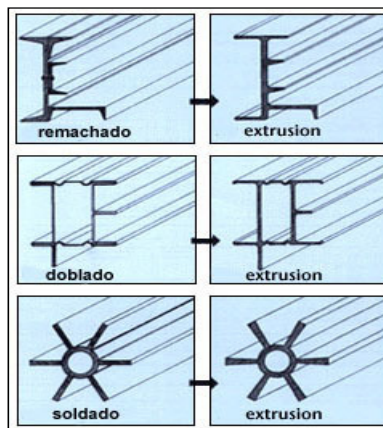


Figura 2.12 – Ejemplos de extrusión

2.5.4 Plegado

El plegado de chapa con un punzón y una matriz montados en una plegadora es un hecho bastante natural y habitual. En principio no parece que esta operación sea complicada y difícil. No obstante, el plegado de chapa no es tan simple como parece. Muchos operarios encuentran inexplicables problemas durante el proceso de plegado. [9]

Por ejemplo, problemas como que no se obtienen los perfiles deseados, que el perfil está fuera de las tolerancias dimensionales que se exigen, marcas en las piezas o roturas durante el proceso de plegado.

A continuación se explicará que existen *tres tipos de plegado* en relación a la fuerza de plegado aplicada.

2.5.3.6 Tipos de plegado

Al realizar un plegado de una chapa en una plegadora, esta se ve sometida a una presión gradual al estar situada entre el punzón y la matriz. El plegado de la pieza estará en relación con la fuerza aplicada. Esto podría ser representado en un gráfico donde se tenga en cuenta los grados a los que se pliega la chapa y la fuerza aplicada.

Entendemos que la chapa plana se corresponde con 180° . Lo primero que observamos en el gráfico es que para empezar a plegar necesitamos una cierta cantidad de fuerza. Una fuerza inferior a esta no produce deformación en la chapa cuando la fuerza cesa. Esto se debe a la elasticidad del material.

A medida que prosigue el plegado la fuerza debe aumentar hasta los 135° aproximadamente. A partir de aquí la fuerza necesaria desciende ligeramente hasta los 100° . A esta zona le llamaremos región 1. A partir de este punto a medida que desciende el ángulo de plegado aumenta la fuerza necesaria.

Para conseguir plegar los 90° necesitamos una fuerza superior a la necesaria para conseguir 130° . La fuerza necesaria para plegar 90° se denomina “fuerza necesaria”. Si seguimos presionando la pieza llegaremos a unos pocos grados por debajo de los 90° . A esta zona le llamaremos región 2.

Si seguimos aplicando más fuerza el ángulo de plegado volverá a ser otra vez 90° . La fuerza necesaria será 6 veces mayor que la “fuerza necesaria”. En esta zona para conseguir una pequeña variación en el ángulo de plegado es necesario un incremento muy grande de fuerza. A esta zona le llamaremos región 3.

A las regiones 1, 2 y 3 les llamaremos plegado parcial, plegado a fondo y acuñado o estampado. A partir de este punto al plegado parcial y al plegado a fondo los unificaremos y nos referiremos a ellos como plegado al aire.

Cuando realizamos un plegado, la elasticidad de la chapa no se elimina aunque el esfuerzo producido en la chapa haya excedido el límite elástico. Podemos considerar al límite elástico como el punto donde la chapa cede al esfuerzo. La plasticidad está más allá de ese punto. Este es el motivo del retorno elástico.

Cuando se realiza un plegado la parte interior de este es comprimida y la parte exterior es extendida o alargada. Entre estas caras existe un plano intermedio, llamado neutro, en el cual no se produce ni compresión ni extensión.

Cuando una chapa es plegada, los esfuerzos que son opuestos actúan en la cara interior y exterior de la chapa. En general, la resistencia a la compresión de la chapa es mucho mayor que su resistencia a la tracción (extensión). La presión ejercida deformará permanentemente la parte exterior de la chapa, pero la parte interior no llega al límite elástico. Por tanto, la parte interior tiende a recuperar su forma inicial. Puesto que el esfuerzo es una fuerza de resistencia que actúa en oposición a la fuerza externa aplicada, el esfuerzo de compresión actúa hacia fuera de la cara interior. Este esfuerzo de compresión se convierte en retorno elástico.

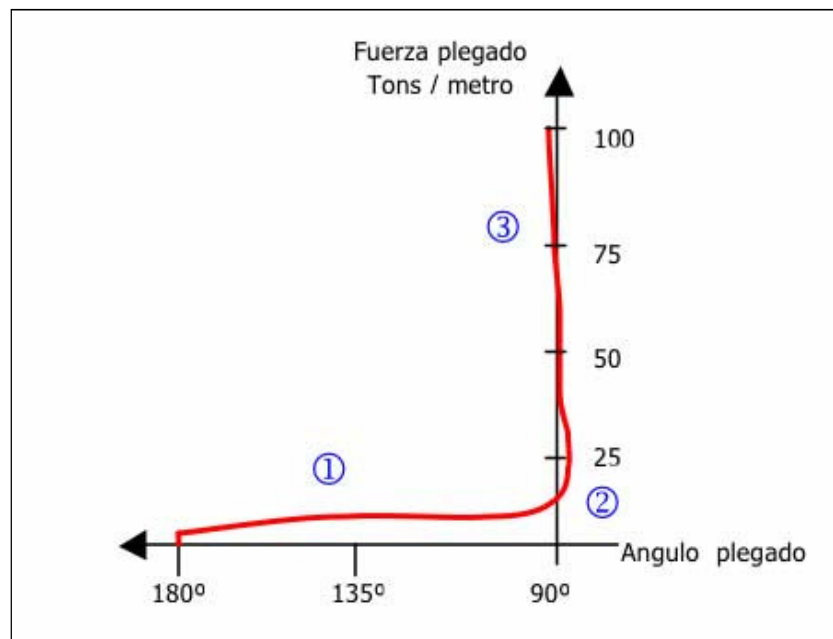


Figura 2.13 – Gráfica Fuerza-ángulo de plegado.

• **Plegado fondo**

El plegado a fondo es uno modo de plegado muy habitual porque se puede plegar con precisión con un tonelaje relativamente bajo.

En la figura inferior la ‘T’ representa el espesor, la ‘V’ la anchura de la matriz y R_i el radio interior de plegado de la pieza. La anchura de la V adecuada varía con el espesor de la chapa. En la tabla podemos observar la relación de la anchura de la V con relación al espesor de la chapa.

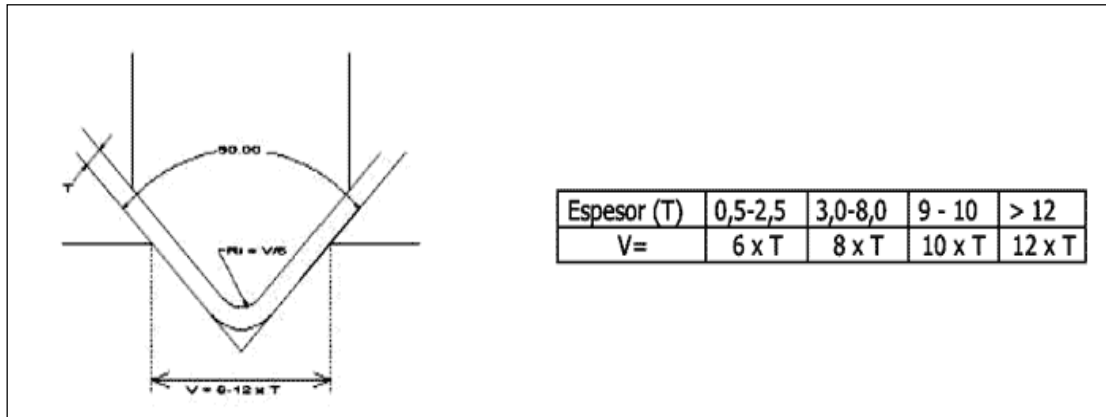


Figura 2.14– Esquema de Plegado a Fondo.

Se observa que a mayor espesor de chapa mucho mayor debe ser la V. Existen otros aspectos a tener en cuenta para escoger la V adecuada para realizar un plegado que serán comentados más adelante.

Por experiencia se sabe que en este tipo de plegado el radio interior de la chapa plegada es un sexto de la anchura de la V ($R_i = 1/6 \times V$). Por otro lado sabemos que la V varía entre 6 y 12 veces el espesor de la chapa. Por tanto, el radio interior de plegado variará entre un valor igual al espesor de la chapa (espesores finos) y el doble del espesor de la chapa (espesores gruesos).

$$R_i = \frac{V}{6} = \frac{6T}{6} = T \quad \text{y también} \quad R_i = \frac{V}{6} = \frac{12T}{6} = 2T$$

En este tipo de plegado se ha de tener en cuenta el retorno elástico del material. Este es el motivo por el que existen utillajes con diversos ángulos similares (90°-88°-85°).

- ***Plegado parcial***

El nombre de plegado parcial se debe al hecho de que la chapa durante el plegado está en contacto con 3 puntos (A, B y C del dibujo inferior) del utillaje.

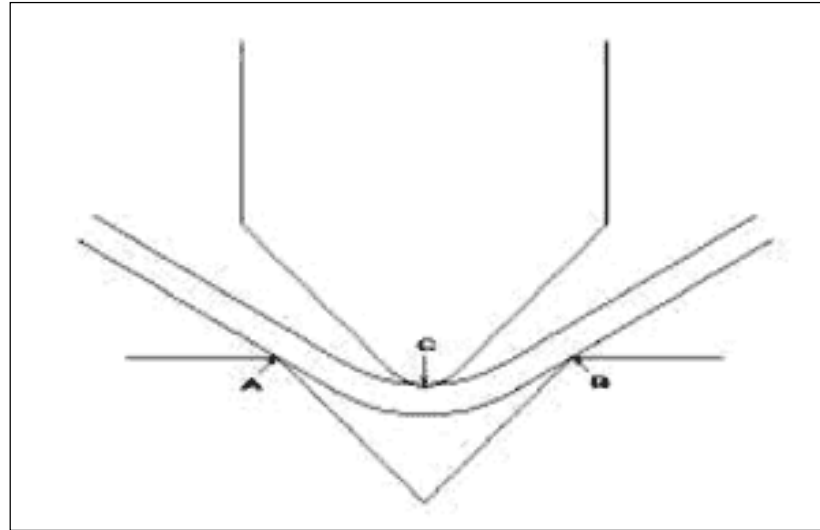


Figura 2.15– Esquema de Plegado parcial.

Con este método de plegado es posible plegar una gran variedad de ángulos. Por ejemplo, con un punzón y una matriz de 30° podemos realizar cualquier plegado desde 180° (chapa plana) hasta un plegado de 30° . Esto lo conseguiremos controlando la penetración del punzón en la matriz. Para ello necesitaremos una plegadora con Control Numérico para que este control sea fácilmente realizable. Con este tipo de plegadoras podremos programar diferentes plegados aunque estos tengan diferentes ángulos de plegado ya que para cada uno de ellos programaremos la profundidad correspondiente.

Por otro lado este tipo de plegado permitirá compensar el retorno elástico ya que solo debemos corregir la profundidad de plegado.

- **Acuñado / Estampado**

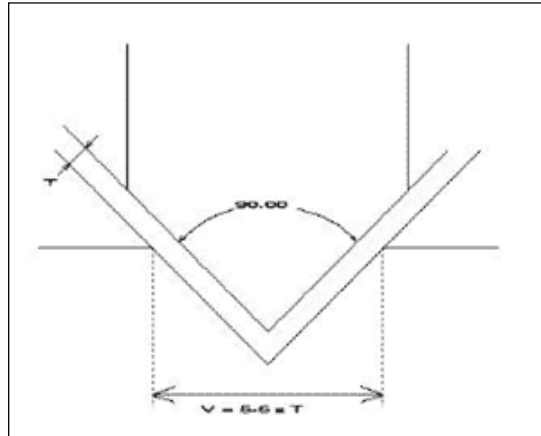


Figura 2.16– Esquema de Estampado/Acuñado.

En el método de acuñado conseguimos 2 ventajas; una precisión muy alta y un radio de plegado muy pequeño. En el dibujo observamos el momento en que está acuñando la chapa y que el pequeño radio del punzón penetra en la chapa. Si además le aplicamos un gran tonelaje eliminaremos los posibles efectos del retorno elástico de la chapa. Este es el motivo por el cual el acuñado necesita un tonelaje entre 5 y 8 veces superior al del plegado a fondo.

Para este tipo de plegado la anchura de la V suele ser de 5 veces el espesor de la chapa para reducir la penetración de la punta del punzón en la pieza reduciendo el radio interno de plegado. También conseguiremos aumentar la presión al reducir el área de contacto de la matriz.

Como ya se ha comentado con este sistema de plegado es necesario una plegadora de gran tonelaje. En función del tonelaje de la plegadora tendremos el límite del espesor de chapa a plegar. Otro de los factores que determinarán el límite de que espesor podemos plegar es el límite de fuerza que puede soportar el tablero superior (“trancha”) que suele ser de unas 100 toneladas por metro.

2.5.4.2 Características generales del plegado al aire y el acuñado

De una forma sencilla podríamos decir que la diferencia entre un plegado al aire y el acuñado es que en el primero es donde existe “aire” en algún lugar entre la matriz y la chapa. De todas formas más adelante explicaremos en detalle los 3 tipos de plegado.

Las características principales del plegado al aire son que la fuerza de plegado es relativamente pequeña. Por tanto la plegadora no deberá ser de gran tonelaje, lo que abaratará el precio de esta. Podríamos decir que es un sistema de plegado económico.

- Hay que tener muy en cuenta el retorno elástico del material para poder obtener una buena precisión en el plegado.

Las características principales del acñado son:

- Es necesario una plegadora de gran tonelaje, de unas 5 a 8 veces más que una plegadora pensada para plegar al aire. Por tanto el coste de la plegadora será elevado.
- La precisión de plegado es muy buena, independientemente del retorno elástico. El utillaje debe ser acorde de las necesidades de este tipo de plegado.

Debido a los adelantos de la tecnología actualmente se tiende a plegar al aire. La mayoría de plegadoras tienen control numérico (CNC), ya sea porque son nuevas o porque a las más antiguas se les ha adaptado uno. Por tanto el problema del retorno elástico se suele compensar fácilmente mediante el CNC tal como hemos explicado en el apartado del plegado parcial.

2.5.5 Embutición

Se denomina embutición al proceso de conformado en frío de los metales, por el que se transforma un disco o piezas recortada, según el material, en piezas huecas, para diversas aplicaciones que van desde el hogar, la oficina y en la industria en general. También partiendo de piezas previamente embutidas, estirarlas a una sección menor con mayor altura. [11]

El objetivo es conseguir una pieza hueca de acuerdo con la forma definida por la matriz de embutición que se utilice, mediante la presión ejercida por la prensa. La matriz de embutición también es conocida como molde.

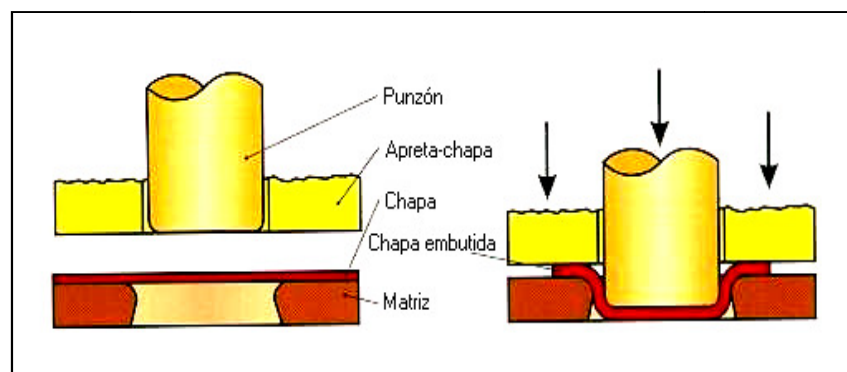


Figura 2.17– Embutido de una etapa con aprieta-chapa.

Se trata de un proceso de conformado de chapa por deformación plástica en el curso del cual la chapa sufre simultáneamente transformaciones por estirado y por recalado

produciéndose variaciones en su espesor. Para la embutición se emplean, casi exclusivamente, prensas hidráulicas.

La embutición es un buen proceso para la fabricación en chapa fina de piezas con superficies complejas y altas exigencias dimensionales, sustituyendo con éxito a piezas tradicionalmente fabricadas por fundición y mecanizado.

2.5.5.1 Herramientas de embutido

Con éste tipo de herramientas de embutición profunda se confeccionan partiendo de discos o piezas recortadas según el material, piezas huecas, e incluso partiendo de piezas previamente embutidas, estirarlas a una sección menor con mayor altura. No se pretende con ésta operación generalmente una variación del espesor del material.

2.5.5.2 Proceso de embutición

Las piezas recortadas o discos a emplear se disponen en el asiento o anillo de centrado, fijado a la matriz de embutir, con la finalidad de centrar el disco en el proceso de embutición. Un dispositivo pisador aprieta el disco contra la matriz de embutir con la finalidad de que no se produzcan pliegues. El punzón de embutir al bajar estira el material sobre los bordes rebordados de la matriz, de modo que se produzca una pieza hueca. El desplazamiento de todos los cristales en que esta constituido el material a embutir es radical en toda su magnitud. Cada uno de los cristales del material se desplaza, en la medida de que este se desliza en la abertura entre el punzón y la matriz.

El desplazamiento del material en ese instante es semejante al flujo de agua por el rebosadero de una presa. Cuando se pretende que el espesor del material no se altere durante el proceso de embutido, el área de la pieza original (disco recortado) debe ser igual al área de la superficie de pieza embutida.

La fricción es un factor que debe tomarse en cuenta por cuanto el material se desliza en la abertura entre el punzón y la matriz. Por lo tanto esta área debe estar pulida y lapeada. Esto reduce la carga necesaria para el desarrollo del embutido. El achaflanado de los bordes de la matriz ayuda a la chapa a resbalar por la pared del agujero, facilitando la operación de embutir. Facilitan también el embutido la lubricación adecuada, del disco recortado y de la herramienta en su conjunto.

El juego que queda entre el punzón y la matriz de embutir tiene que ser mayor que el espesor de la chapa. Se han acreditado como conveniente para el caso de chapas de acero, holguras de 1,12 a 1,30 veces el espesor de la chapa, para chapas de latón, holguras de 1,08 a 1,20 veces el espesor, para chapas de aluminio la holgura es de 1,04 a 1,10 veces el espesor.

2.5.5.3 Determinación de la pieza recortada y sujeción de fases en la embutición

Antes de poder empezar a fabricar una herramienta para embutir hay que determinar la forma y el tamaño del recorte de la chapa, así como el número de las fases y las dimensiones de la herramienta para cada fase de embutición.

Para determinar el diámetro del disco para piezas embutidas cilíndricas, hay que calcular la dimensión superficial de la pieza. Esta dimensión superficial se compone de la superficie del fondo más de la pared lateral. El área de la pieza a recortar (disco) tiene que ser igual a la de la pieza a obtener. De aquí se determina entonces el diámetro de recorte. Del mismo modo se determina el diámetro del recorte para piezas embutidas que vayan provistas de bridas, un talón cilíndrico o fondo hemisférico. Los diámetros así calculados proporcionan piezas embutidas tan altas que es necesario recortar en ellas el reborde. El recortado es necesario porque con solo en piezas con embutición pequeñas, la altura es uniforme.

El **número de fases** o de etapas de embutición depende de la relación que exista entre la magnitud del disco y de las dimensiones de la pieza embutida, de la facilidad de embutición del material y del espesor de la chapa. A más profundidad se quiera dar a la pieza a embutir, más etapas serán necesario para la embutición y con ello tanto más herramientas y operaciones. Por ello es necesario prever la forma de realizar siempre operaciones con el menor número de etapas o de piezas simple.



Figura 2.18– Diferentes fases del proceso de embutición de una pieza.

2.5.5.4 Fórmulas para determinar la pieza a recortar requerida para el embutido

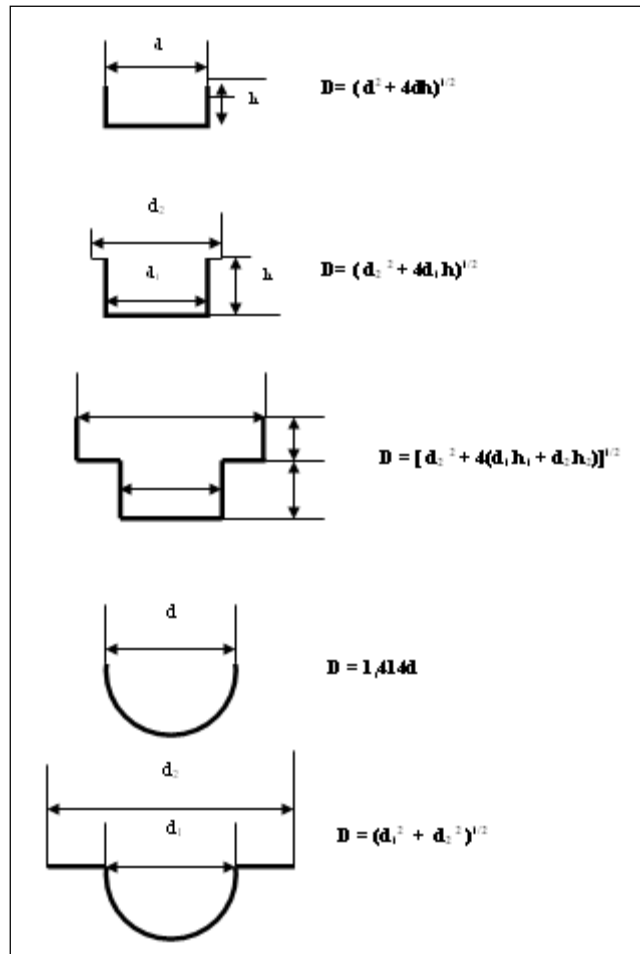


Figura 2.19– Fórmulas para el tamaño del recorte inicial.

2.5.5.5 Tipos de Herramientas de Embutido

Herramienta de Embutido de Acción Simple

En este tipo de herramienta el disco recortado a embutir se fija en su asiento, al actuar la placa prensa disco, el punzón comienza a penetrar el material en la matriz en su totalidad.

Seguido se expulsa la pieza embutida por acción de un expulsor, obteniéndose una pieza de estas características

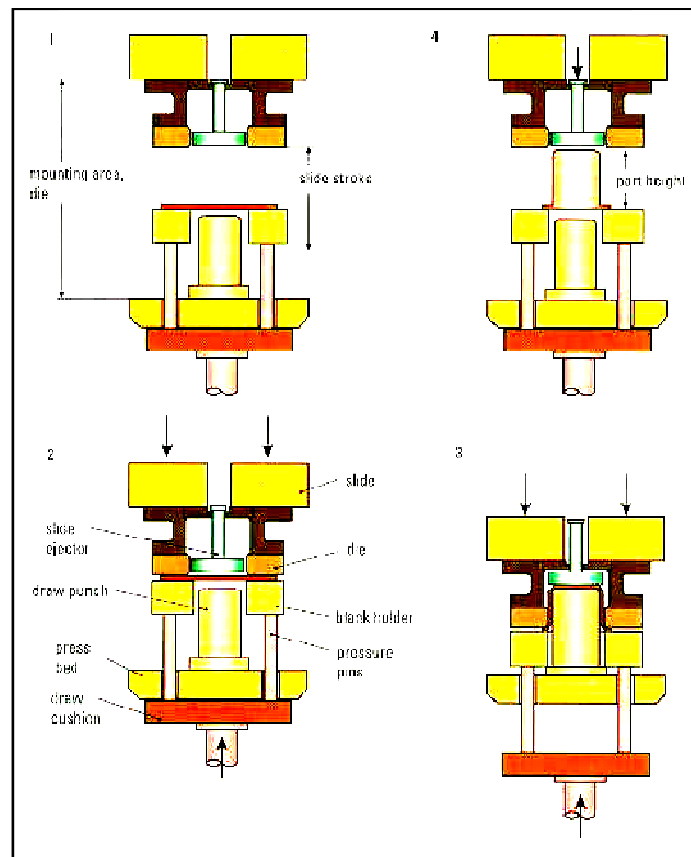


Figura 2.20 – Embutición simple con un amortiguador



Figura 2.21– Pieza Embutida mostrando la dirección del desplazamiento del material durante el proceso

Herramientas de Embutido de Doble Acción

En este tipo de herramientas, el punzón se ubica en la parte superior de la corredera (prensa), el disco recortado se ubica también en su asiento en la matriz y el punzón y la placa prensa disco actúan simultáneamente y la matriz cuenta con el expulsor.

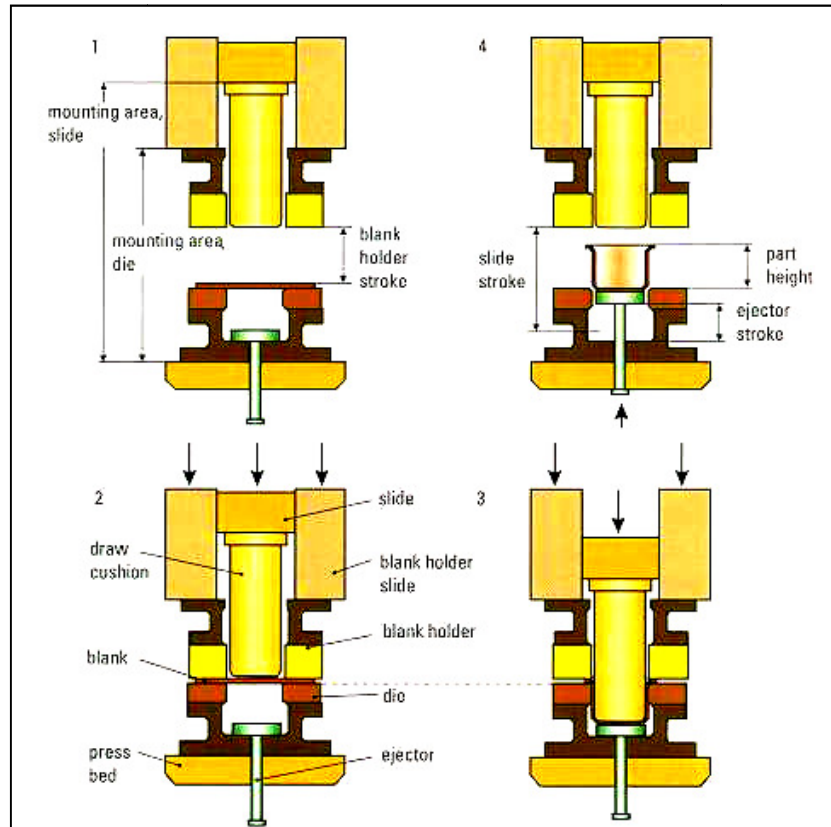


Figura 2.22– Embutición con prensa de doble efecto

Herramienta de Embutido Telescópico

Se utiliza en piezas previamente embutidas con la finalidad de conseguir una mayor altura y por consiguiente una pieza de menor diámetro, para ello se debe contar con un juego de punzón y matriz adecuado, de tal manera de conseguir el objetivo, como quiera que con el embutido previo, el material deformado ha conseguido una acritud debe ser tratado térmicamente para recobrar su elasticidad, esto se debe aplicar en cada fase del proceso de embutido.

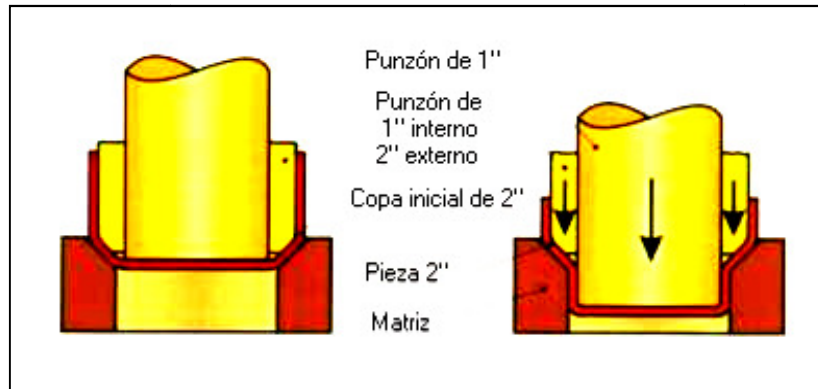


Figura 2.23– Embutición con punzón telescópico

Para conseguir la altura y el diámetro necesario requiere muchas veces de utilizar varias etapas de embutido, tal como ya se a explicado anteriormente, para lo cual es necesario, el uso de de este tipo de herramientas, con el consiguiente juego de punzón y matriz adecuadas a la circunstancias. El objetivo se consigue forzando el material a deslizarse adecuadamente entre dos punzones adaptados convenientemente a la nueva configuración de la matriz.

Herramientas de Embutido Inverso

Con estas herramientas se consigue también una mayor altura, para ello se debe de contar con la herramienta, los materiales convenientemente dispuestos y acondicionados para tal fin.

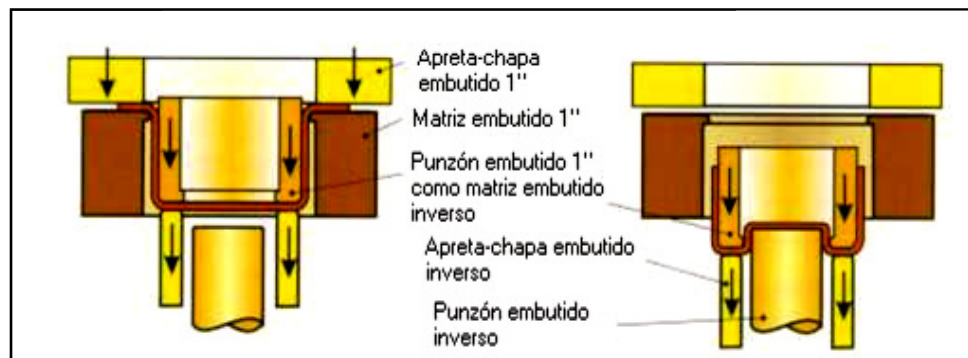


Figura 2.24– Embutición inversa

La embutición inversa ofrece la posibilidad de ahorrar una o dos etapas de embutición. Con éste tipo de embutición la pieza previamente embutida se dispone con la abertura hacia abajo sobre una matriz negativa de embutir. El punzón de embutir que desciende sobre la pieza así dispuesta la vuelve de modo de modo que era hasta ahora superficie interior se convierte en superficie exterior de la misma. De ésta

modo se obtiene con una herramienta profundidades mayores que con la embutición corriente. Por lo general no se necesita ningún dispositivo pisador.

En la práctica se dispone de que en la herramienta, que con la carrera descendente de la corredera, una pieza hueca pre-embutida y al descender el punzón se determina la pieza al actuar negativamente la herramienta.

La embutición negativa se emplea casi exclusivamente para piezas cilíndricas o piezas redondeadas no cilíndricas por ejemplo carcasas de faro o proyectores. Para piezas irregulares resultaría muy dificultosa la ejecución de las aberturas en la matriz invertida.

Recalcado o Repujado en torno

Con este tipo de procedimiento, es posible conseguir piezas de gran altura y volumen, con ellas se construyen las ollas, los sartenes de cocina, faroles, trofeos, etc.

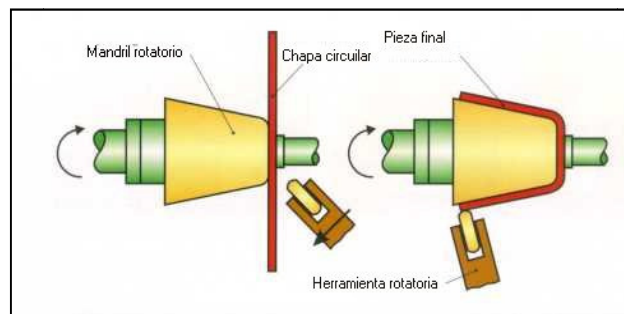


Figura 2.25– Proceso de repujado

2.5.5.6 Límites de Embutición

Dependiendo del tipo de material, del espesor del mismo, existe un límite en el diámetro a embutir, entendiéndose que es necesario en la mayoría de los casos, realizar varias operaciones de estampación, seguidas de una serie de tratamientos térmicos con la finalidad de conseguir el diámetro y altura adecuada.

El diámetro de la primera matriz de embutido se puede determinar a partir una relación entre los diámetros del disco recortado y el diámetro de la primera matriz, considerando un factor en función del material. Este factor es el siguiente:

$$\phi_{\text{PRIM MATRIZ}} = \frac{\phi_{\text{CHAPA}}}{1,75}$$

Para trabajos de mayor precisión se pueden hacer uso de tablas y gráficos en las que se determinan los diámetros, las fases de embutidos que hay que realizar.

2.5.5.7 Consideraciones en diseño de las herramientas

Las prensas de discos

Llamada también prensa chapas, pueden tener diversa disposiciones tal como se muestra en el gráfico que se muestra, su función es evitar la formación de pliegues y facilitar el desplazamiento del disco entre la matriz y el punzón.

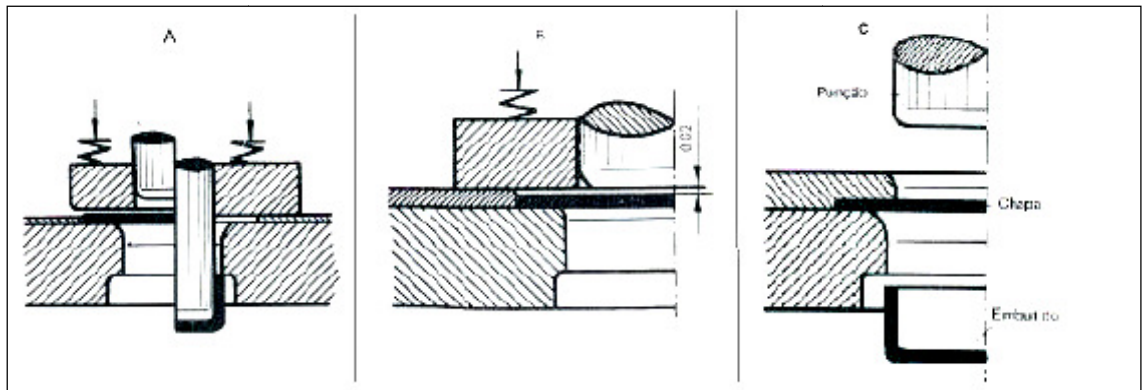


Fig. 2.26– Prensa de disco o de chapa

Las herramientas también se pueden construir sin prensas chapas, para ello se debe acondicionar la matriz con los chaflanes respectivos a fin de ayudar al desplazamiento del material en el momento de la tracción, tal como se muestra en el gráfico.

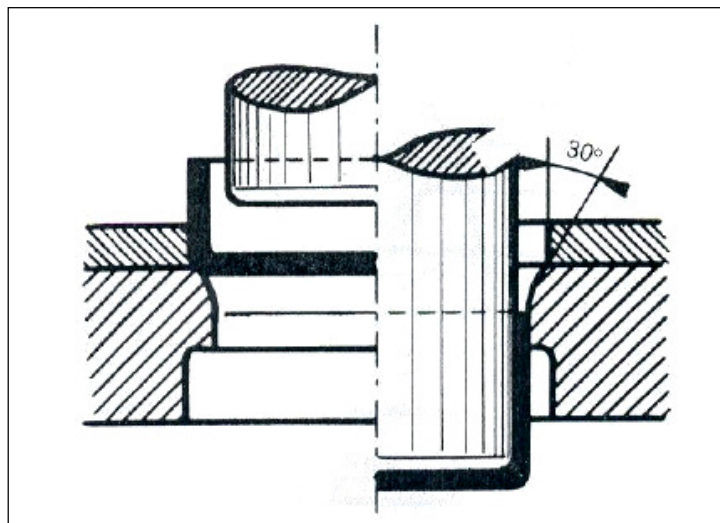


Figura 2.27– Matriz con chaflanes

Herramientas de embutido telescópico

En ellas se debe tener en cuenta algunas consideraciones para conseguir el objetivo de lograr el estirado del material, para ello la matriz deberá de contar con un chaflán conveniente determinado mediante ensayos, aunque se considera aceptable uno de 45° tal como se muestra en el gráfico adjunto.

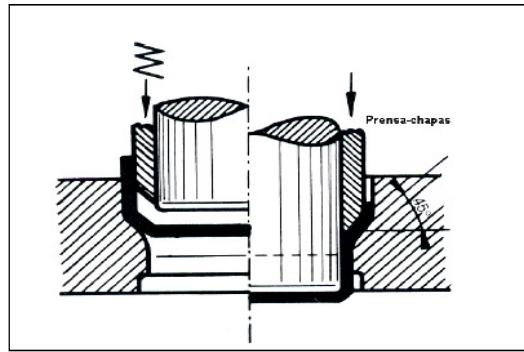


Figura 2.28– Consideraciones tomadas para las herramientas de embutido telescópico

Radios y achaflanados en la matriz.

Son los responsables de la facilidad o no con que se desplaza el material durante la tracción, son responsables también de la formación de los pliegues, de que el material se desgarre, adquiera mayor dureza el material como resultado del embutido.

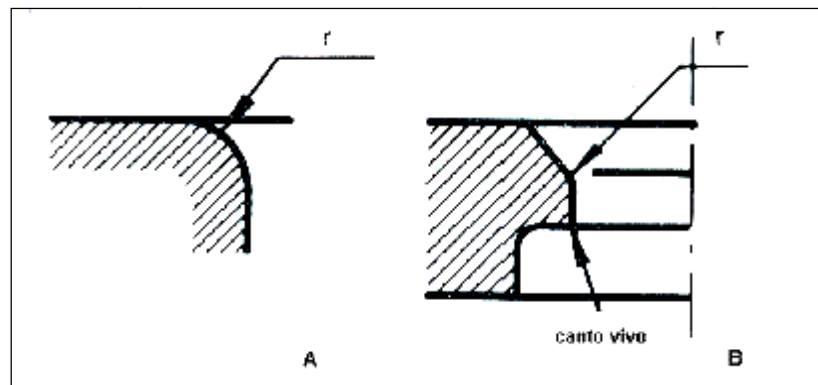


Figura 2.29– Detalles de radio y achaflanado en una matriz

Extracción de la pieza embutida

Como consecuencia del esfuerzo de tracción el material embutido tiende a quedar pegado al punzón y si no se prevé un sistema que facilite la extracción de la pieza del punzón puede significar problemas posteriores, una forma adecuada es el tal como se muestra en el gráfico que se adjunta, haciendo un resalte o talón en la parte inferior de la matriz.

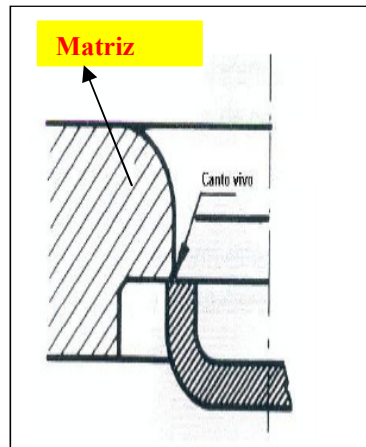


Figura 2.30– Detalles de resalte o talón de la matriz

Extractor con anillo y resorte

Es común el uso de anillos partidos unidos por un resorte que actúan como extractor, el diámetro interior del anillo deberá llevar un redondamiento adecuado que permita el paso del punzón y el material, estirando el resorte durante el descenso del mismo, durante el ascenso del punzón el resorte se comprime y actúa el anillo como extractor.

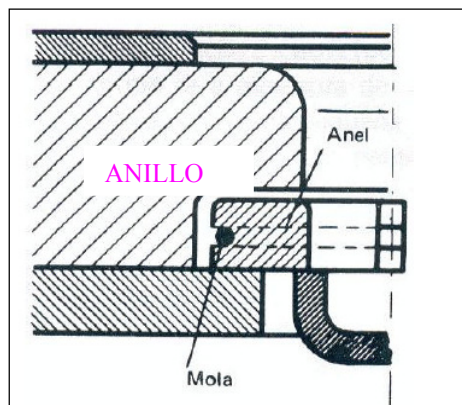


Figura 2.31– Detalles de resalte o talón de la matriz

Capítulo 3

Método de los elementos finitos

3.1 Diseño y análisis mediante programas de AEF

Los programas de AEF (análisis por elementos finitos), permiten obtener soluciones aproximadas de problemas que sean susceptibles de ser representados por un sistema de ecuaciones diferenciales. [7]

En Ingeniería, la mayoría de los procesos actuales están definidos de dicha forma, por lo que dichos programas nos permitirán obtener productos de calidad superior a un menor coste, o para mejorar procesos existentes, o para estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo.

Si se utiliza un programa de AEF se puede ayudar a reducir el tiempo total de desarrollo de un producto, reduciendo el número de ciclos prototipos- pruebas- ensayos-evaluación. Incluso, en algunos casos, no es deseable o práctico el realizar un prototipo: aplicaciones biomecánicas, aeroespaciales, etc.

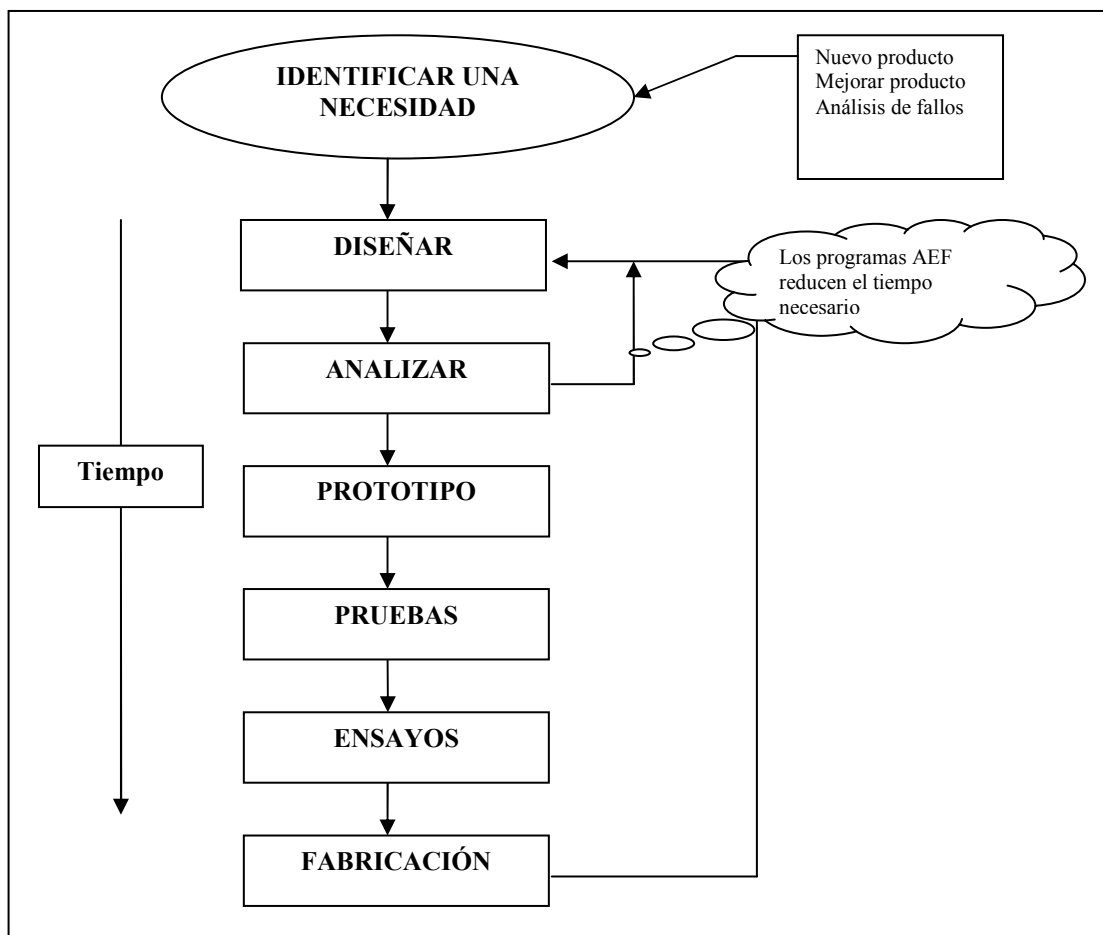


Figura 3.1– Esquema de ahorro de tiempo con AEF

3.2 Visión general de ANSYS

Existen en la actualidad numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como ABAQUS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, etc.; de todos se ha elegido ANSYS por tratarse de una herramienta versátil de análisis por elementos finitos, teniendo en cuenta la relación entre la calidad del producto y su coste, a fecha de hoy.

Es un programa de “Uso General” quiere decir que, en primer lugar, el programa incluye muchas capacidades generales, tales como funciones de pre-procesador (para generar un modelo), soluciones, post-procesador, gráficos, modelado paramétrico y utilidades para que el programa sea fácil de usar. En resumen, no se trata de un programa especializado para resolver problemas, sino que nos permitirá satisfacer muchas necesidades complejas de diseño y análisis.

3.3 El método de los Elementos Finitos (MEF)

La transformación de un sistema de ingeniería (con infinitas incógnitas) a un modelo de elementos finitos es quizás, uno de los más importantes y que requiere un conocimiento profundo del MEF.

En realidad dicho modelo es una idealización matemática de un sistema real cuyo comportamiento deberá, al menos, de ser intuitivo, pues de otro modo la modelización puede ser muy laboriosa o imposible.

El término elemento finito resume el concepto básico del método: la transformación de un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, a uno que tiene un número finito de incógnitas relacionadas entre sí por elementos de un tamaño finito.

Un nudo es una localización en el espacio de un punto en el que se considera que existen ciertos grados de libertad (desplazamientos, potenciales, temperaturas, etc.) y acciones (fuerzas, corrientes, condiciones de contorno...) del sistema físico.

Un elemento es una representación matemática matricial, denominada matriz de rigidez, de la interacción entre los grados de libertad de un conjunto de nudos. Los elementos pueden ser puntuales, lineales, superficiales, volumétricos, y pueden estar en espacios bi o tridimensionales.

Cada nudo tiene ciertos grados de libertad (GDL's) que caracterizan la respuesta del campo (las ecuaciones diferenciales que representan el problema que se quiere resolver).

En un sistema estructural, el conjunto de grados de libertad incluye tres traslaciones y tres rotaciones.

La información se “pasa” de un elemento a otro por los nodos comunes.

Los GDL en un nudo dependen de los elementos que se conectan en dicho nudo.

Las condiciones de contorno estructurales incluyen:

- 2 Restricciones de desplazamientos.
- 3 Fuerzas aplicadas en nudos
- 4 Presiones sobre los elementos
- 5 Temperatura en nudos
- 6 Cargas volumétricas o de inercia (gravedad).

Capítulo 4

Planteamiento del Proyecto

4.1 Objetivo

El objetivo como se dijo en el primer capítulo, será ver el funcionamiento del Mallado Adaptativo y demostrar que hacer las simulaciones con este método, reduce el tiempo de diseño y de cálculo.

4.2 Descripción general del proyecto

4.2.1 Embutición

Para realizar la simulación de embutición se utilizarán los siguientes cuerpos:

- Punzón
- Matriz
- Chapa o placa

Para el punzón y la matriz se utilizarán sólidos infinitamente rígidos y la chapa será sólido pero con un comportamiento elástico- plástico. El punzón es cilíndrico. Las formas de los cuerpos se pueden ver más claramente en estas figuras que se muestran a continuación:

- **Chapa:** esta es la placa de la que se partirá para hacer la primera simulación. Es bastante simple y sólo se hará una embutición sobre ella.

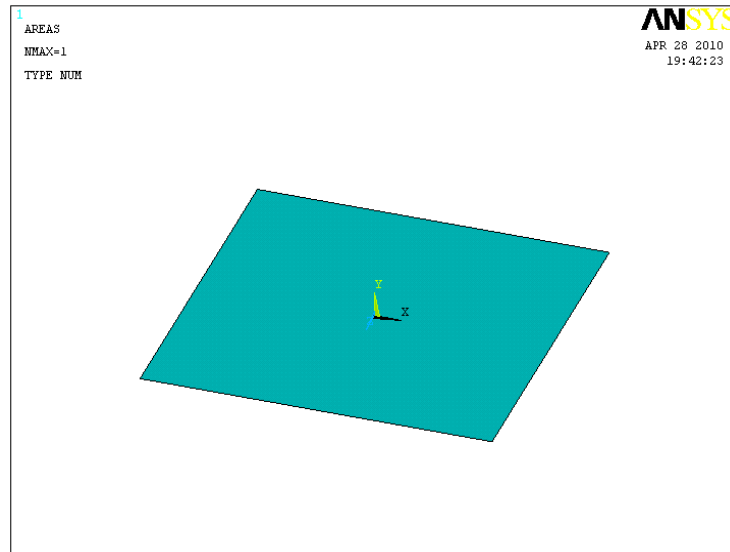


Figura 4.1– Chapa utilizada en la simulación.

- **Punzón:** esta herramienta será la encargada de ejercer una fuerza sobre la placa para que la deforme plásticamente y así quedará con la forma deseada permanentemente.

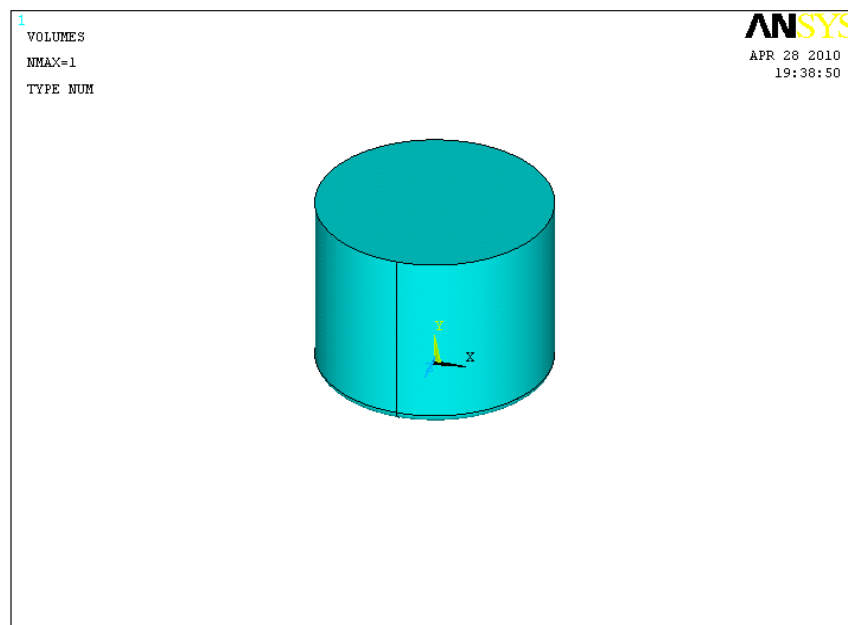


Figura 4.2– Punzón utilizado en la simulación

- **Matriz:** es el utillaje utilizado para contrarrestar las fuerzas aplicadas sobre la placa por parte del punzón. Se puede decir que es el molde con la forma de pieza requerida.

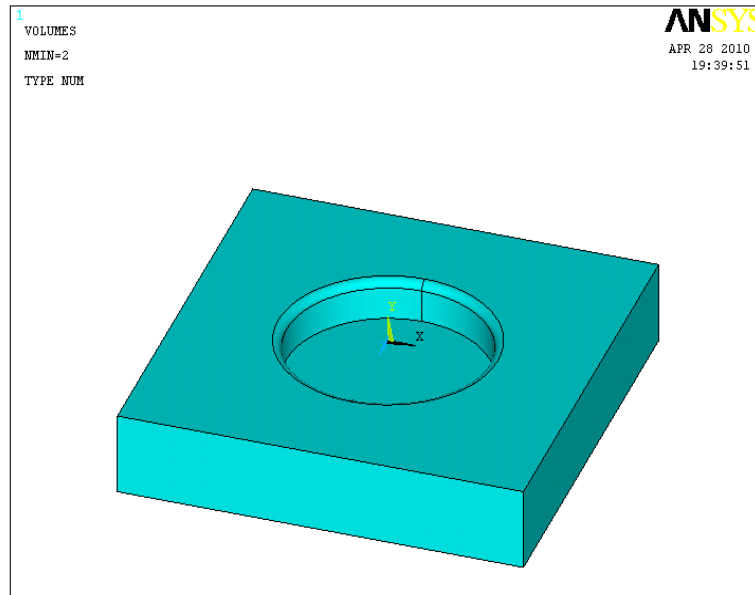


Figura 4.3– Matriz utilizada en la simulación

Para el desarrollo del proyecto se deben tener en cuenta algunas consideraciones:

- Los movimientos de la placa estarán restringidos en sus cuatro lados.
- Los movimientos de la matriz estarán todos restringidos y se conseguirán restringiendo los la base de la matriz.
- El punzón sólo se desplaza en el eje Y.

Los pasos que se realizarán serán los habituales en este tipo de montajes. Más tarde se definirán más exhaustivamente pero una buena definición general podría ser:

1. Generación de la geometría.
2. Definición de los materiales.
3. Mallado de los cuerpos.
4. Imposición de las coacciones.
5. Selección de las cargas.

Para poder desarrollar de forma correcta el proceso de simulación, se deben conocer antes las funcionalidades del paquete LS-DYNA, las características que lo diferencian de ANSYS y la relación existente entre los paquetes de simulación.

4.2.2 Estampación

Este proceso es un poco más complejo que el anterior y además se hará en dos pasos (etapas) debido las restricciones que nos exige el *límite de embutición*. Si se hiciera en un único paso, la pieza deseada se podría romper o arrugar por lo que la manera más óptima de realizar esto es en dos etapas.

Para el *primer paso* de la estampación se utilizarán los siguientes elementos:

- **El Punzón:** esta herramienta es la que le da forma a la placa en el primer paso de la estampación.

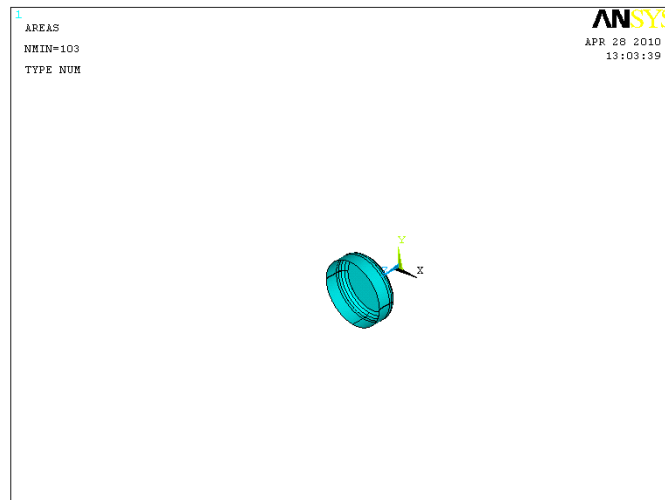


Figura 4.4– Punzón utilizado en la simulación

- **El pisa:** es un utillaje que tiene la función de sujetar la chapa mientras se produce la estampación porque en los primeros ensayos se vio que la chapa se doblaba demasiado y no se cumplían los requerimientos iniciales.

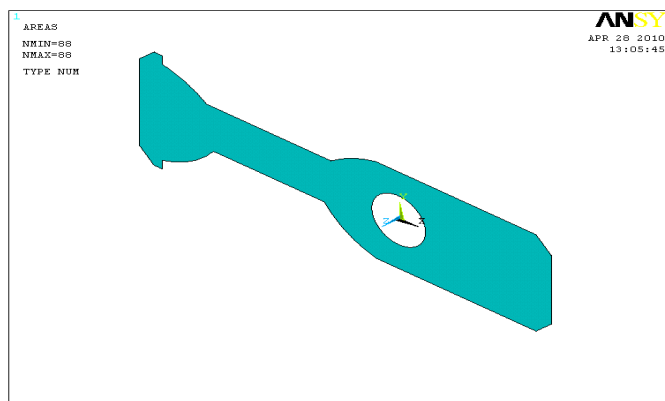


Figura 4.5– Pisa utilizado en la simulación

- **La Placa:** es la pieza origen que se transformará para obtener la pieza deseada. Antes de la primera estampación tendrá esta forma, en la segunda estampación, se partirá de la deformada en la primera etapa.

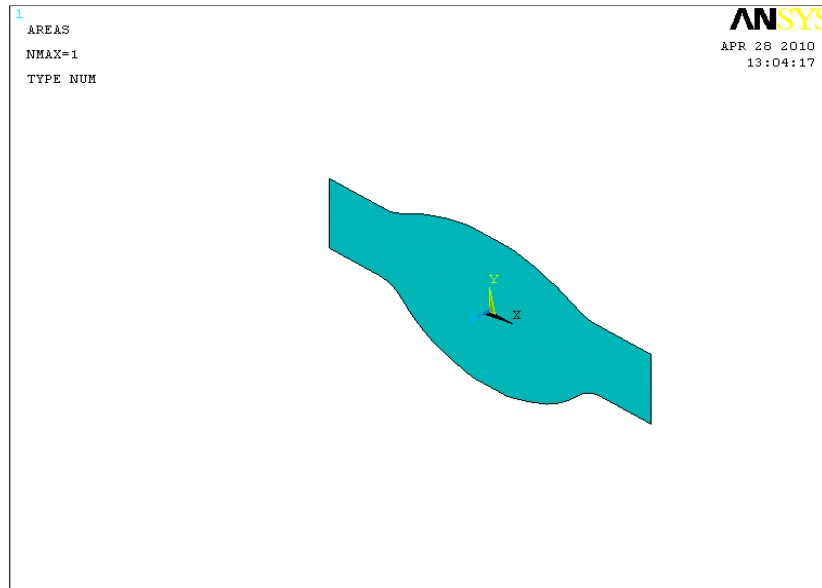


Figura 4.6– Placa utilizada en la simulación

- **La Matriz:** esto otro utillaje, se utiliza para contrarrestar las fuerzas que ejerce el punzón contra la chapa y así darle la forma exacta que se quiere obtener. Actúa como molde.

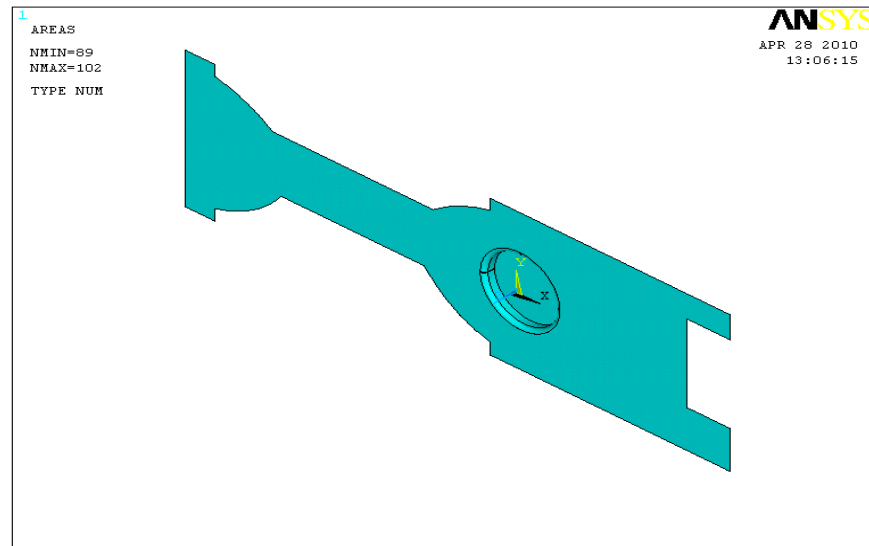


Figura 4.7– Matriz utilizada en la simulación

Para el *segundo paso* de la estampación se partirá de los siguientes elementos:

- **El punzón:** se puede observar que este punzón es más fino que el anterior porque lo que se intenta es embutir sobre la base de la estampación anterior. Siendo el punzón más pequeño.

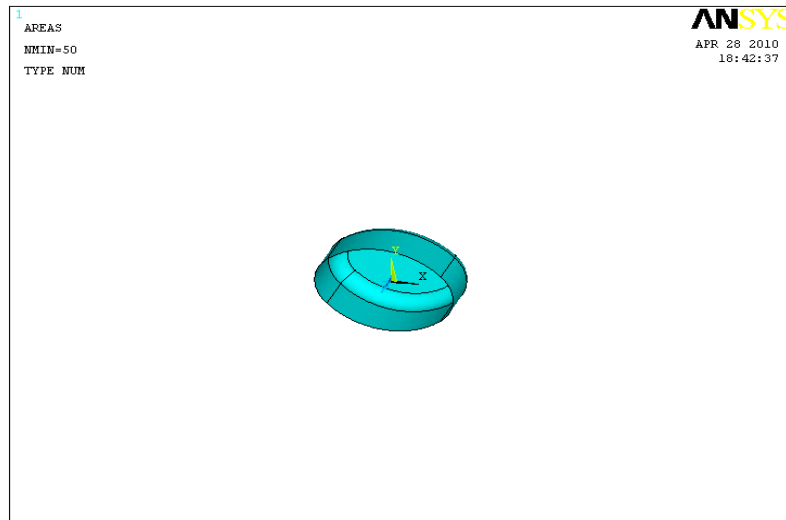


Figura 4.8– Punzón utilizado en la simulación

- **Pisa extra:** este utillaje tiene la función de sujetar la chapa por la parte que está plana y que se desea que no tenga ninguna curvatura.

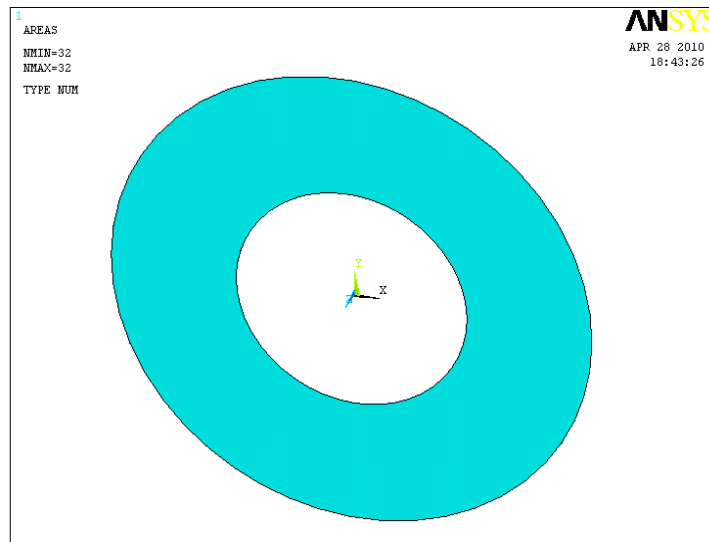


Figura 4.9– Pisa extra utilizada en la simulación

- **Pisa Punzón:** es un pisa encargado de proteger la parte que se embutió en la primera estampación. Tiene la misma forma que se le dio a la chapa y le previene de roturas y arrugas que se pueda producir.

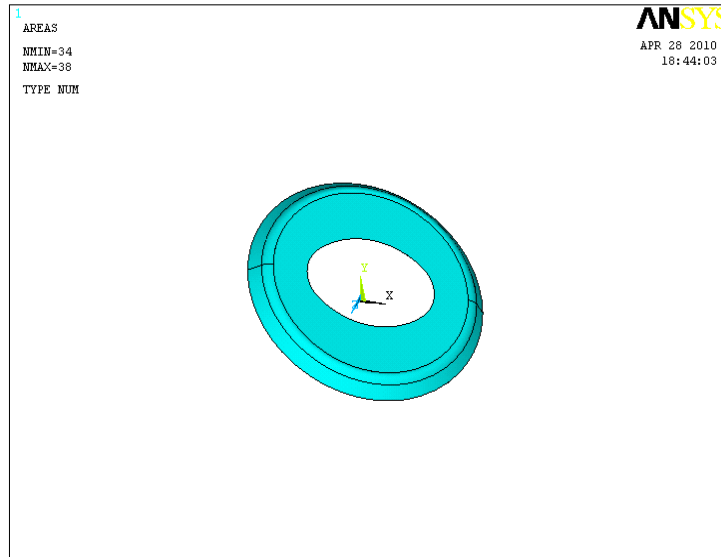


Figura 4.10– Pisa punzón utilizado en la simulación

- **Matriz:** como se definió anteriormente, la matriz contrarresta la fuerzas ejercidas por el punzón y otro utillajes para que la chapa al quedar en medio, adopte la forma que se desea.

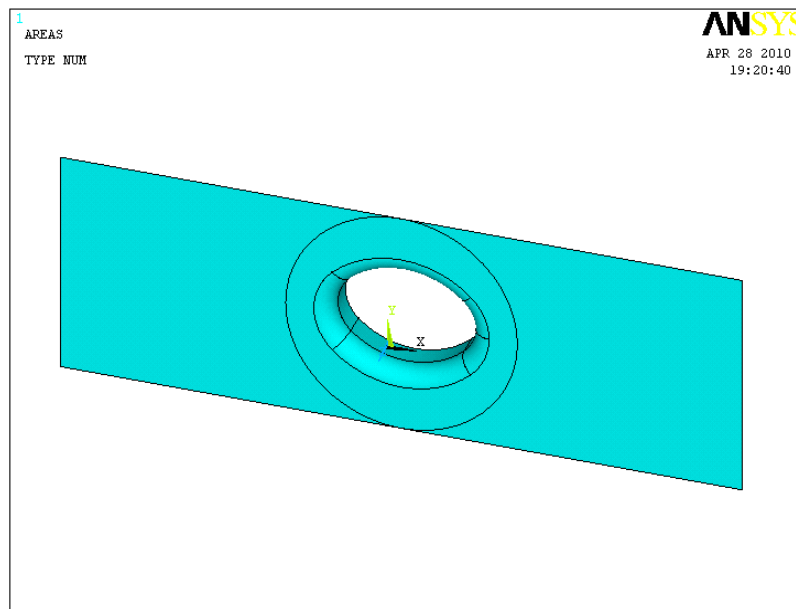


Figura 4.11– Matriz utilizada en la simulación.

- **Pisa Matriz:** este utillaje se podría decir que es la base de la matriz pero se desea que sea independiente para que ejerza una fuerza constante sobre la base de la pieza y así las calidades sean mayores.

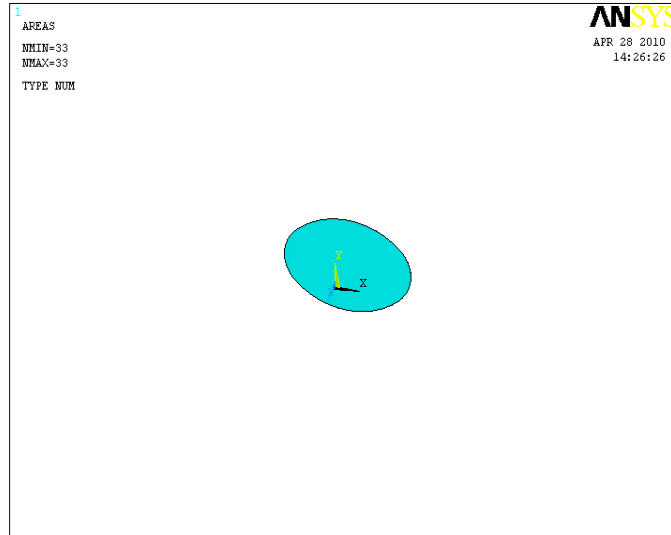


Figura 4.12– Pisa matriz utilizada en la simulación

Estos pasos (etapas) en la estampación surgen originalmente de la necesidad de la fabricación de una pieza de la industria del automóvil. La pieza es la que sujeta la rueda de repuesto un tipo de modelo de coche determinado. En este proyecto sólo se simularán las dos primeras etapas del proceso para obtener la pieza ya que el objetivo es la explicación del mallado adaptativo. Con las simulaciones de estas dos primeras etapas se puede comprender como funciona el mallado adaptativo en LS-DYNA. La pieza final sería:

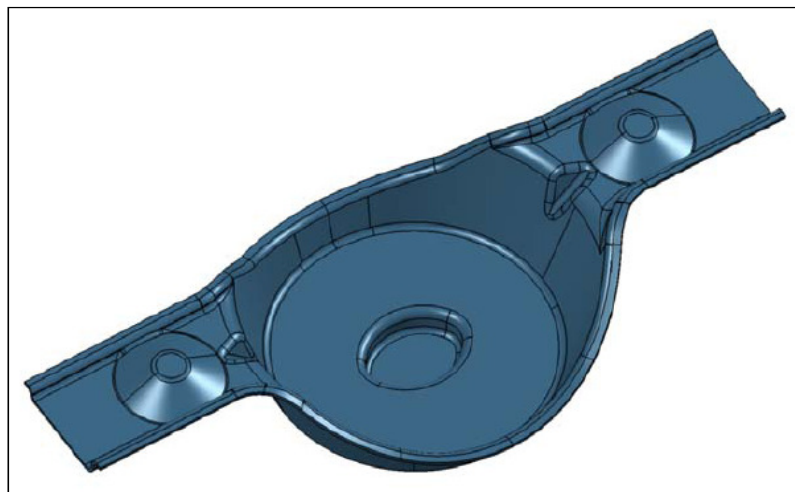


Figura 4.13– Pieza final si se hicieran todas las etapas

4.3 LS-DYNA vs. ANSYS

Hablar de la relación entre ANSYS y LS/DYNA es lo mismo que hablar de las diferencias entre simulaciones implícitas y explícitas. [14]

El motor original de ANSYS proporciona soluciones a problemas implícitos. Estos tipos de problemas tienen las siguientes características:

- Los materiales presentan un comportamiento lineal.
- Las fuerzas son aplicadas en grandes lapsos de tiempo, y éstas no son despreciables frente a otras.

Dicho de otro modo, el motor implícito de ANSYS resuelve procesos estáticos o cuasi- estáticos.

Por el contrario, LS/DYNA resuelve procesos que son radicalmente opuestos a los resueltos por ANSYS:

- Proporciona una alternativa a los análisis dinámicos transitorios no lineales de ANSYS (posibilidad de Spring back).
- Está destinado a simulaciones de grandes deformaciones en las que dominan las fuerzas de inercia y se tienen en cuenta las no linealidades.

Igualmente, su formulación explícita resuelve problemas altamente no lineales de comportamiento del material, de impacto, aplastamiento y problemas de deformación rápida, con los métodos numéricos más eficientes disponibles en la actualidad. Estos problemas llamados explícitos, son radicalmente opuestos a los que resuelve ANSYS, y por lo tanto requieren de un motor de resolución adecuado.

ANSYS LS/DYNA combina el código explícito de elementos finitos LS/DYNA con las potentes capacidades de pre y post-procesado del ANSYS. Con este paquete integrado, se puede modelar la estructura en ANSYS, obtener la solución dinámica explícita a través de LS/DYNA y comprobar los resultados vía las potentes herramientas estándar de post-procesado de ANSYS.

Evidentemente, cada método o motor de resolución tiene sus ventajas e inconvenientes de cara al tiempo de proceso y los recursos computacionales empleados. Por lo tanto, se debe plantear la cuestión de si un problema implícito es abordable de forma explícita, y en caso de serlo, si es preferible resolver el problema de ésta forma.

El método implícito supone calcular el proceso sobre la base de un movimiento no dinámico. La principal desventaja es la menor precisión que esto supone, pues no

refleja de forma fiel el proceso real. Igualmente, no permite visualizar las arrugas formadas en el proceso, aunque algunos sistemas tras encontrar la solución calculan las zonas sometidas a compresión y muestran las posibles arrugas que se formarían en el proceso. La principal ventaja que ofrece este método es la velocidad de cálculo, pues son poco exigentes de cara a los recursos necesarios y a la cantidad de memoria empleada en la determinación de la solución.

Por el contrario, la solución explícita sí se realiza sobre la base de un cálculo dinámico, por lo que la simulación es más cercana al proceso real. Esto provoca que la simulación sea más cercana al proceso real. Esto provoca que la simulación sea muy precisa, revelando incluso las arrugas generadas en el proceso.

La razón por la que se emplea a menudo la resolución implícita es que necesita muchos menos recursos de computación para ser resuelta. Mientras que la solución implícita se resuelve en una sola iteración, la solución explícita depende del tiempo, por lo que debe resolverse una simulación completa (campos de tensión y de deformación) para que cada incremento de tiempo hasta llegar al tiempo de final de simulación.

Por lo tanto, abordar un problema implícito mediante una simulación explícita es posible, pero sacrificando tiempo y recursos de computación.

4.4 La adaptatividad

LS-DYNA incluye un método h-adaptativo para los elementos que son placas. En un método h-adaptativo, los elementos se dividen en elementos más pequeños mientras que un indicador de error muestra que la subdivisión de elementos proporcionará una mejora de la precisión. El objetivo del proceso adaptativo usado en LS-DYNA es obtener la mejor precisión para una serie de recursos dados. El usuario realiza un mallado inicial con el máximo nivel de adaptación y el programa divide estos elementos las máximas veces que pueda el cual es mostrado por el indicador de error. Aunque esto no suministra control sobre el error de la solución, hace posible obtener una solución de similar precisión con menos elementos y además, con menos recursos informáticos que con una malla fija [5].

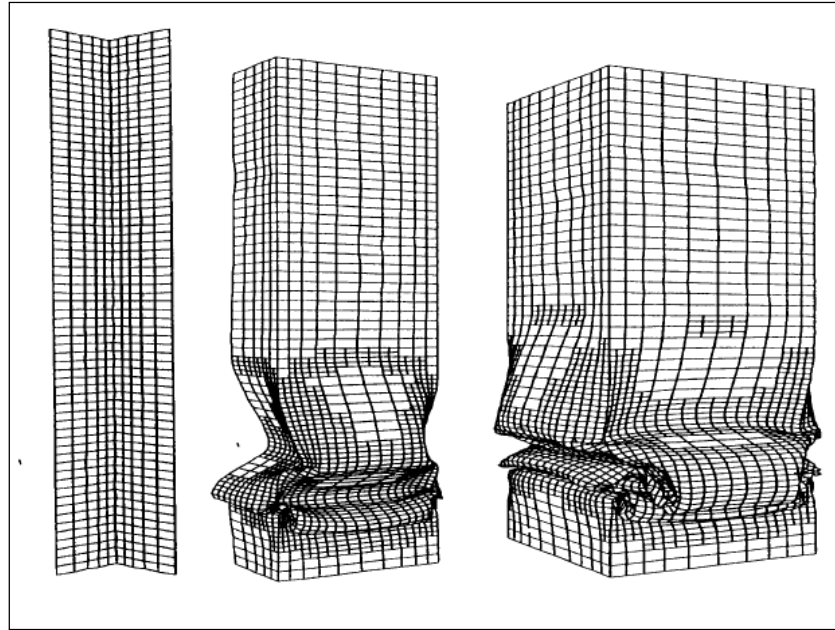


Figura 4.14– Cálculos en el primer nivel de adaptatividad sobre la sección de una estructura con elementos cuadrados

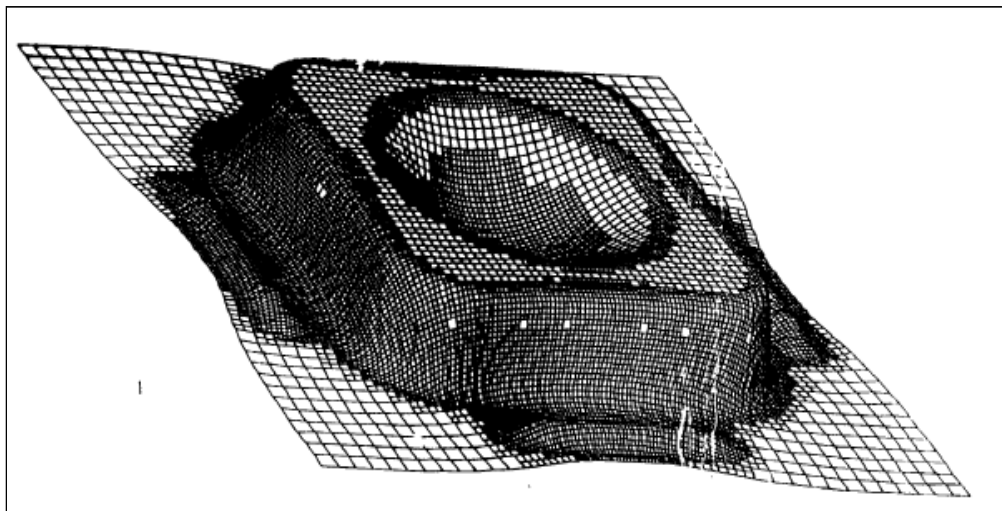


Figura 4.15 – Forma final de una chapa deformada con 4315 elementos en la malla

LS-DYNA usa un proceso h-adaptativo donde las partes de la malla son selectivamente refinadas durante el curso del proceso de la solución. En éste, los elementos fueron también fusionados o combinados hasta que se consideró que ya no eran necesarios. Fue descubierto que la implementación de los procesos de fusión para mallados normales, tal y como ocurren típicas aplicaciones de programas comerciales, es demasiado complejo, por lo tanto se incluyen solamente fisión. Adaptación en LS-DYNA puede ser restringido para algunos grupos específicos de elementos de placa. Los elementos de este grupo se dice que está el dominio de adaptación activa.

En el proceso h-adaptativo, los elementos se subdividen en elementos más pequeños donde se necesita precisión: este proceso se llama fisión. Los elementos que se usan en el proceso de fisión se subdividen en elementos de lado $h/2$, donde h es el tamaño característico de los elementos origen. Esto se ilustra en la figura un elemento que es un cuadrilátero. En fisión, cada cuadrilátero es subdividido en cuatro cuadriláteros con el uso puntos medios de los lados y del centro de los elementos para generar cuatro nuevos cuadriláteros.

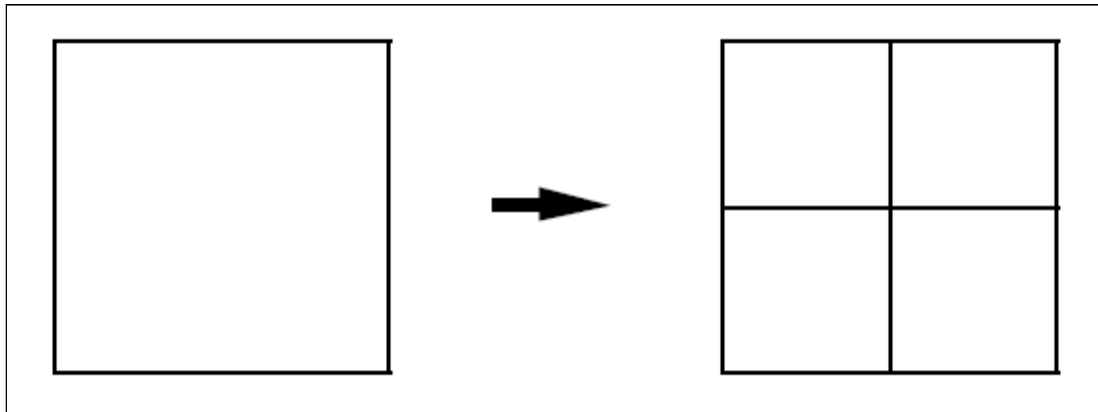


Figura 4.16– Fisión de elemento cuadrilátero

Le proceso de fisión para un elemento triangular se muestra en la figura 4.17 donde el elemento es subdividido en cuatro triángulos usando los puntos medio de tres lados.

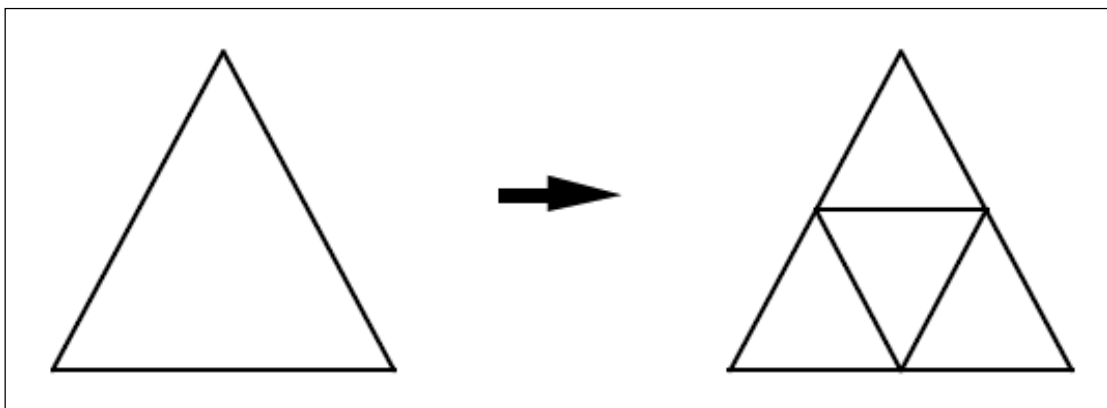


Figura 4.17– Fisión de un elemento triangular

El proceso adaptativo puede consistir en varios niveles de fisión. La figura muestra una subdivisión la cual se llama el segundo nivel de refinamiento. En los siguientes pasos, los elementos fisionados pueden otra vez ser fisionados en un tercer nivel de refinamiento y estos pueden ser otra vez fisionados en un cuarto nivel como muestra la figura. Los niveles de de adaptación que ocurren en una malla son restringidos por tres reglas:

1. El número de niveles es restringido por el máximo nivel de adaptación que se permite en una malla el cual es generalmente 3 ó 4. En el cuarto nivel hasta 64 elementos se generarán para cada elemento en la malla inicial.
2. Los niveles de adaptación implementados en una malla deben ser tal que los niveles adaptación implementados en elementos inmediatos difieran como máximo, un nivel.
3. El número total de elementos puede ser restringido por la memoria disponible. Una vez que la memoria en uso es alcanzada, la adaptación cesa.

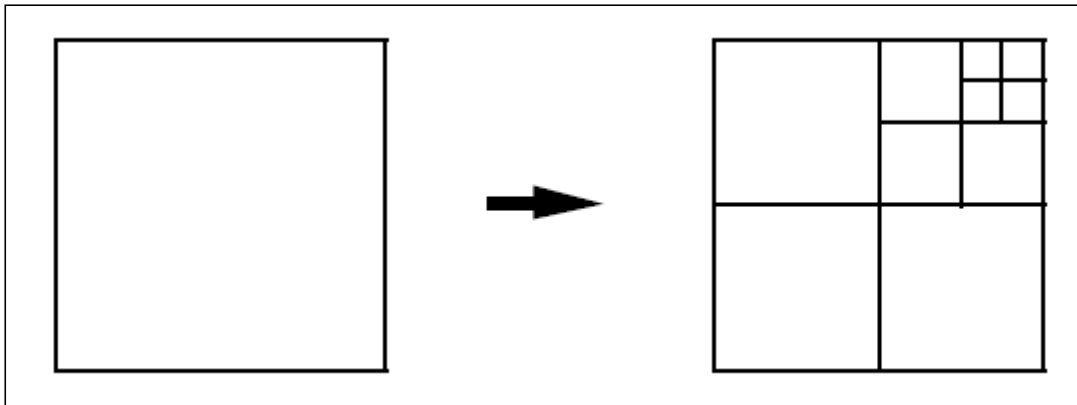


Figura 4.18– Elemento cuadrilátero fisionado en el cuarto nivel

La malla original proporcionada por el usuario es conocida como la malla padre, los elementos de esta malla son conocidos como los elementos padres y los nodos son llamados nodos padres. Algunos elementos que son generados en el proceso de adaptación son llamados elementos descendientes y los nodos que son generados por el proceso de adaptación son nodos descendientes. Los elementos generados en el segundo nivel de adaptabilidad son llamados elementos de primera generación. Estos generados en el tercer nivel de adaptabilidad se llaman elementos de segunda generación.

Las coordenadas de los nodos descendientes se generan por el uso de interpolación lineal. Así, las coordenadas de algunos nodos generados durante la fisión de un elemento es dado por

$$x_N = 1/2 (x_I + x_J)$$

donde x_N es la posición del nodo generado y x_I y x_J son nodos a lo largo del lado en el cual x_N fue generado por un elemento caracterizado.

La coordenada del punto medio del nodo el cual es generado por fisión de un elemento cuadrilátero, es dado por

$$x_M = 1 / 4 (x_I + x_J + x_K + x_L)$$

donde x_M es el nuevo nodo del punto medio del cuadrilátero fisionado y x_I, x_J, x_K y x_L son los nodos del cuadrilátero original. Las velocidades de los nodos son también dado por una interpolación lineal. Las velocidades de los nodos de los filos son dados por

$$v_N = 1 / 2 (v_I + v_J)$$

y las velocidades angulares son dadas por

$$w_N = 1 / 2 (w_I + w_J)$$

Las velocidades de los puntos medios del nodo de un elemento de un cuadrilátero fisionado es dado por

$$v_M = 1 / 4 (v_I + v_J + v_K + v_L)$$

$$w_M = 1 / 4 (w_I + w_J + w_K + w_L)$$

Las tensiones en los elementos descendientes son obtenidas de los elementos padres mediante el establecimiento de las tensiones en los elementos descendientes igual que las tensiones en los elementos padres en los correspondientes puntos de cuadratura a través del espesor.

En los siguientes pasos, los cuales no están en las esquinas de los nodos de todos los elementos ligados son tratados como nodos esclavos. Son manipulados por una simple ecuación de restricción.

Los indicadores de refinamiento se usan para decidir la localización del refinamiento de la malla.

Después de que el refinamiento de la malla es determinado nosotros podemos refinar la malla y continuar el cálculo o back-up en tiempo anterior y repetir parte del cálculo con la nueva malla. Por razones de precisión y estabilidad método de después es generalmente preferido. Sin embargo, el método primero es preferido por velocidad. Si el LS-DYNA recupera o repite el cálculo o continúa después el remallado se determina por parámetro de entrada llamado ADPASS.

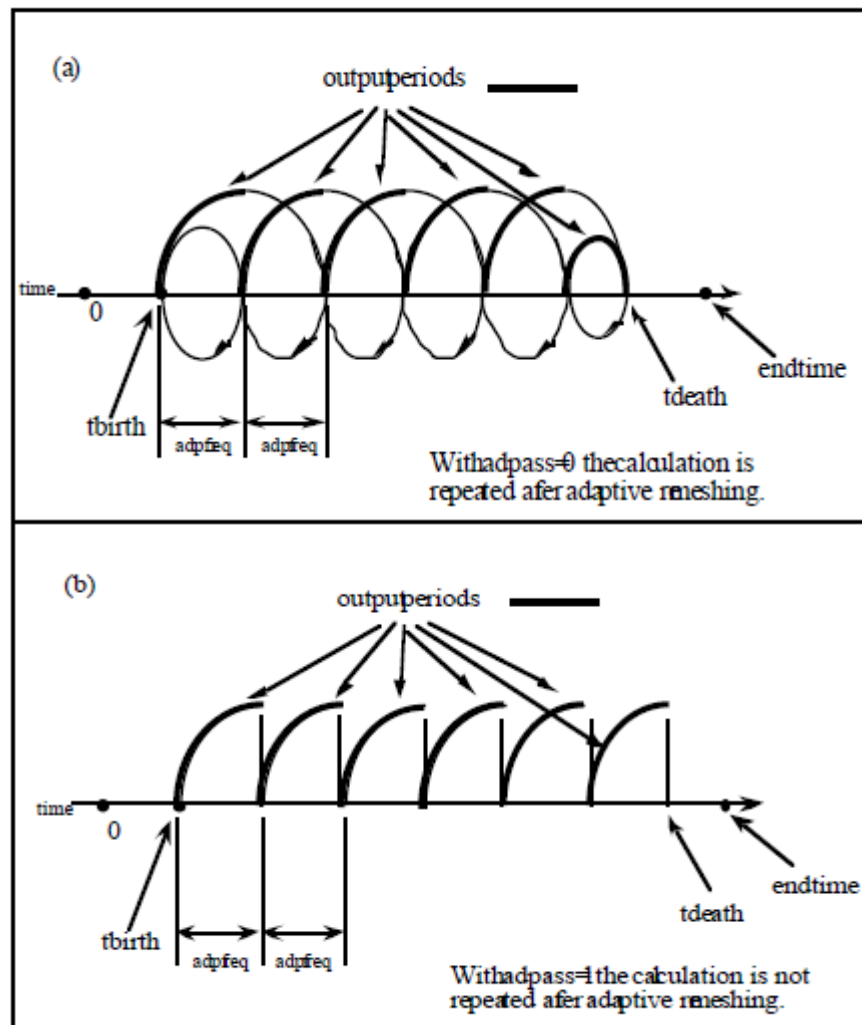


Figura 4.19– El parámetro de entrada, ADPASS, controla dentro de LS-DYNA, guardar una copia y repite los cálculos después de un refinamiento adaptativo

Capítulo 5

Desarrollo del Proyecto

5.1 Introducción

En este apartado se explicará el proceso que se sigue de forma general para crear un código que sea capaz de realizar una simulación, en especial la parte explícita. Esta descripción de cómo se crea un código para una simulación se hará de una manera general aunque estará más centrada e ilustrada en las primeras simulaciones, es decir, en la primera embutición.

Se seguirán los siguientes pasos:

1. Generación de la geometría
2. Selección de los tipos de elementos
3. Introducción de las constantes reales
4. Selección de las propiedades del material
5. Modelado
6. Mallado
7. Contacto entre superficies
8. Imposición de coacciones
9. Imposición de cargas
10. Control de tiempo y de la salida de datos

Con estos puntos quedará definido el código pero se añadirán dos puntos más para salvar la base de datos y para ver los resultados

5.2 Construcción del modelo

El primer paso en un análisis explícito dinámico es crear el modelo que representará el sistema físico para ser analizado. Se usa el PREP7 Preprocessor para construir el modelo. [5]

Si se construye el análisis a través de la interfaz que nos facilita ANSYS (GUI), es importante primero establecer las opciones preferentes para “LS-DYNA Explicit” en las que los menús están correctamente filtrados para mostrar las opciones de entrada dinámicas-

5.3 Generación de la geometría

La forma más fácil de crear la geometría de un modelo es con las opciones de modeling en el menú de ANSYS. Para modelos simples, se puede elegir utilizar el método de generación con modeling. Con este método, se define los nodos y las líneas del modelo directamente. Si la geometría a tratar tiene un nivel de complejidad superior, no resulta rentable hacerlo de este modo. Por esta razón ANSYS permite importar geometrías de otros programas (Pro/Engineer, CATIA o Parasolid) en diferentes formatos gráficos.

En nuestro caso, se crearán las geometrías de la matriz y el punzón en Solidedge. El formato de volcado utilizado será ACIS (extensión del archivo *.igs*). Desde el menú de ANSYS se puede acceder a una opción de importar elementos y desde aquí importaremos nuestra matriz y punzón con este formato. La chapa es un elemento bastante simple por lo que se creará directamente con la interfaz de ANSYS.

5.4 Selección de los tipos de elementos

Lo primero que se debe hacer es leer en el manual las diferentes descripciones que hay de los elementos para ver cuál se adecua más a nuestro proyecto. La elección del tipo de elemento adecuado es clave a la hora de hacer una simulación correcta. Básicamente para un análisis explícito se pueden utilizar los siguientes elementos:

- LINK160
- BEAM161
- PLANE162
- SHELL163
- SOLID164
- COMBI165
- MASS166
- LINK167
- SOLID168

Cada uno tiene unas características determinadas por lo que para profundizar más se debe acudir la guía de usuario de LS-DYNA [4].

Una vez se hayan pensado y elegido los elementos apropiados para representar el sistema, se aplica esto en el programa mediante el comando ET (también en el GUI mediante las opciones **Main Menu>Preprocessor>Element Type**).

Para ilustrar algo este apartado se definirán los elementos utilizados para la primera embutición. Se considerarán dos tipos de elementos:

- **Para la chapa**

La chapa que se quiere deformar será un elemento de tipo *shell*. Hay varios tipos de elemento *shell* pero para nuestra simulación se cogerá el elemento shell163. Es un elemento de 4 nodos. ANSYS recomienda este tipo para las simulaciones que vamos a hacer porque hay opciones que se van a utilizar que sólo permiten este elemento para que se ejecute correctamente.

Este elemento tiene 12 grados de libertad en cada nodo: traslación, aceleración y velocidad en cada dirección nodal x , y y z y rotaciones sobre los ejes nodales x , y y z . La geometría del elemento puede verse en la Fig.- 4.7

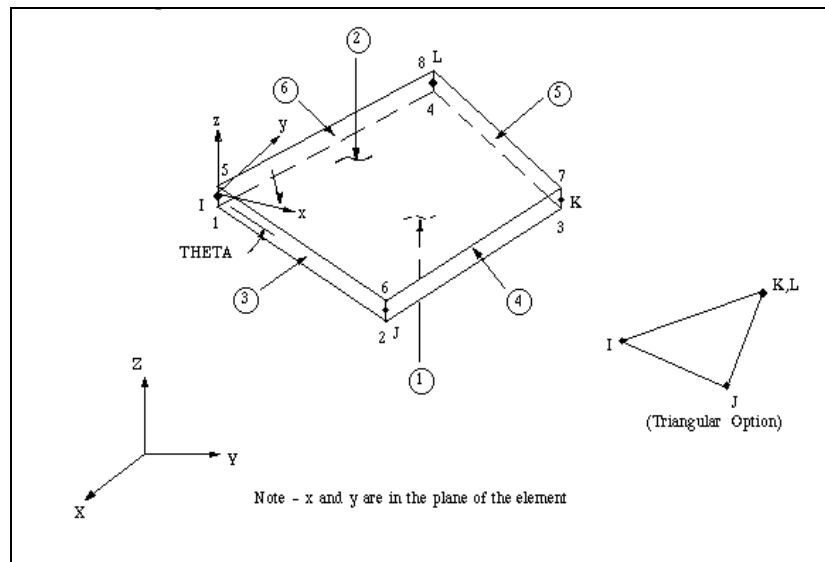


Figura 5.1– Elemento Shell 163

Para este elemento hay disponibles 20 formulaciones y se escogerá la Belytschko-Tsay. Esta formulación es la más rápida de las chapas explícitas dinámicas y es la recomendada por el manual de ANSYS. Tiene el inconveniente de que no puede ser empleada para mallas gruesas pues el error que nos daría sería excesivo. Tampoco es recomendable usarlo con para elementos que experimenten un excesivo pandeo.

5.5 Introducción de las constantes reales

Cada descripción del material en la referencia de materiales de ANSYS cataloga todas las constantes reales que son asociadas con el elemento. Se debe determinar que constantes reales son requeridas para cada tipo de elemento en el modelo. Para especificar las constantes reales se usa el comando **R** (también en el GUI eligiendo **Main Menu>Preprocessor>Real Constants**).

En nuestro modelo el único elemento que requiere constantes reales el tipo *shell*. Las constantes requeridas son:

- *Número de puntos de integración (NIP)*

Es el número de capas en que está dividida la chapa a lo ancho de su espesor. El elemento *shell163* admite 3 o más. Si se especifican 2, los resultados se calcularán para la cara externa y la cara interna. La cara intermedia será la media aritmética entre las dos anteriores. Se puede ver en esta figura:

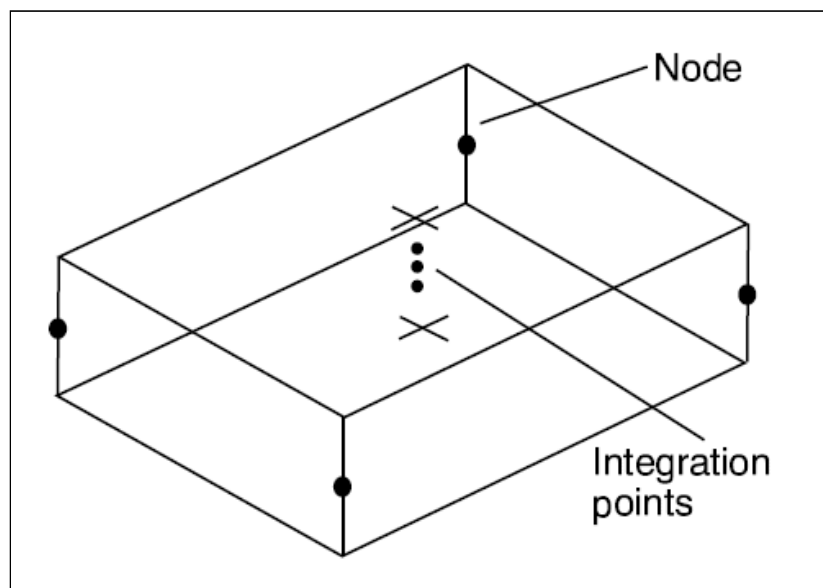


Figura 5.2– Puntos de integración

- *Espesor*

Es el espesor de la chapa. En nuestra simulación será dos el espesor. Dado que la chapa parte de un espesor constante, sólo será necesario especificarlo en el nodo 1.

5.6 Selección de las propiedades del material

Hay muchos modelos de materiales disponibles para usar en un análisis explícito dinámico. Se puede acudir al manual para ver los diferentes tipos y cuál es el mejor para cada simulación.

Una vez decidido el modelo de material para usar en nuestro análisis, se deben definir todas las propiedades asociadas con el modelo. Para el modo de batch o de comando que son los nuestros, generalmente se usan los comandos de **MP**, **TB** y **TBDATA** (en algunos casos el comando **EDMP**). En la GUI, los modelos de materiales son definidos de la siguiente manera en el menú de ANSYS: **Main Menú>Preprocessor>Material Props>Material Models**.

Después de seleccionar los modelos de materiales apropiados, se deberá definir las propiedades necesarias para este modelo. Los materiales se pueden especificar ya sea de la librería interna de ANSYS o creando directamente el material. Se utilizarán los siguientes materiales:

- *Herramientas y utillajes*

Para estos elementos se utilizarán como se explicó anteriormente, materiales infinitamente rígidos. Además esta decisión agilizará el proceso de cálculo de la simulación y de aplicación de las condiciones de contorno y de carga. En este apartado se deberán introducir parámetros reales tales como el módulo de Young, densidad y módulo de Poisson para que LS-DYNA sea capaz de calcular la rigidez de las superficies de contacto entre cuerpos. No se deben poner valores muy altos de módulos de Young, Poisson y de densidad porque pueden producir resultados erróneos. El cuerpo no se deformará debido a su condición de perfectamente rígido.

El programa nos permite coaccionar los grados de libertad del material creado. Por tanto, para facilitar nuestro cálculo se coaccionarán todos los grados de libertad de la matriz. Del punzón se coaccionarán todos excepto su desplazamiento que va a ser en el eje Y.

- *Chapa*

Introducir los datos de las propiedades mecánicas de este material es un poco más complejo debido a que la chapa será la que deforma. Especificar correctamente estas propiedades es más un problema de Ciencia de los Materiales y en las simulaciones definitivas se deberá acudir a las especificaciones del suministrador del material.

En el proyecto se ha decidido utilizar el modelo *Plastic Kinematic* dentro de los modelos inelásticos con endurecimiento cinemático. Para definir este material el programa nos pide datos de comportamiento del material tales como: módulo de Young, módulo de Poisson, densidad, fluencia, módulo de tangencia, endurecimiento, velocidad de deformación y tensión de fallo.

Dentro del LS-DYNA, hay disponibles modelos de materiales lineales, no-lineales elásticos y no-lineales inelásticos. Dentro de este último (el de mayor aplicación para los requerimientos aquí expuestos), se encuentran modelos como el isotrópico lineal, el isotrópico lineal dependiente de la temperatura, el bilineal con endurecimiento cinemático o el plástico con endurecimiento cinemático.

5.7 Modelado

Como se adelantó en un capítulo anterior, la geometría de nuestros elementos del proyecto se importará del otro programa y no se realizarán cambios.

5.8 Mallado

Una vez construido el modelo sólido, se está preparado para mallar el modelo con nodos y elementos.

El proceso de mallado está compuesto principalmente de tres pasos:

- Elección de los elementos a mallar.
- Introducción los parámetros de mallado.
- Generar la malla.

Para la elección de los elementos, se coge los que previamente se definieron con el tipo de elemento, constantes reales y propiedades de los materiales para usar en el mallado. Se usan los comandos **TYPE**, **MAT** y **REAL** o con el menú de la siguiente manera:

- **Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Attributes > Default Attribs**

- **Main Menu > Preprocessor > Modeling>Create>Elements>Elem Attributes**

El parametrizado de la malla nos permite indicar el tamaño y la forma de los elementos para usar durante el mallado. Hay numerosos parámetros disponibles en ANSYS. En la GUI, se acceden a estos controles picando en:

- **Main Menu >Preprocessor>Meshing>Mesh Tool**

Después de especificar los parámetros deseados para el mallado, el modelo se malla con los comandos de mallado (AMESH, VMESH, etc.). En la GUI, las opciones de mallado están accesibles picando en **Main Menu >Preprocessor>Meshing>Mesh** o de la otra forma con **Mesh Tool (Main Menu >Preprocessor>Meshing>Mesh Tool)**.

En nuestra simulación se mallarán la chapa, las herramientas y los utillajes con los parámetros explicados detalladamente en el comentario del código.

Las simulaciones que resuelve LS-DYNA son dinámicas aunque ocurran en un corto espacio de tiempo. Por este motivo, el motor de resolución calcula el proceso completo a través de pequeños intervalos de tiempo que ANSYS denomina *time steps*. Estos pasos de tiempo determinan la precisión de la solución final. Si usamos grandes pasos de tiempo, el cálculo se agilizará, pero el resultado final será menos preciso. Si se usan pasos cortos, el tiempo de cálculo se verá incrementado pero los resultados finales serán muy precisos.

En procesos calculados con LS-DYNA es el elemento de la malla de menor tamaño el que marcará el tiempo de cálculo de solución. ANSYS calcula el dt (incremento de tiempo entre *time steps*) de la solución en función del tamaño del elemento más pequeño por lo que cuanto más fina se haga la malla, más recursos y tiempo de proceso se necesitará. No obstante, se puede intervenir en el cálculo del elemento más pequeño (por lo tanto en el dt de la simulación), variando el factor de escala del *time step* calculado usando el comando EDCTS. Nosotros dejaremos que LS-DYNA calcule el dt que estime necesario

5.9 Contacto entre superficies

En análisis explícitos dinámicos a menudo incluyen contacto entre superficies. La definición de contactos está compuesta por cuatro pasos:

- Determinar el tipo de contacto el cuál define mejor el modelo físico (comando **EDGEN**)
- Identificar superficies de contacto (comando **CM**, **EDPART** o **EDASMP** con el comando **EDGEN**).
- Especificar los parámetros del coeficiente de fricción (comando **EDGEN**)
- Especificar entradas adicionales requeridas para la elección del tipo de contacto (comando **EDGEN** y **EDCONTACT**).

Si el contacto automático no se usa, se debe definir el contacto de superficies por la agrupación de nodos en cada superficie dentro de un componente con el comando

CM. Una vez estos componentes son creados, se usa el comando EDGEN para especificar el contacto entre las superficies deseadas. Se debe también identificar el tipo de contacto con el comando **EDGEN**. Para algoritmos de contactos simples de superficies exteriores de los cuerpos en contacto son determinadas por ANSYS LS-DYNA.

El comando EDGEN también se usa para especificar los parámetros del coeficiente de fricción y otras entradas que especifican los diferentes tipos de contactos. Las opciones de contactos esta en la GUI de la siguiente manera **Main Menu> Preprocessor> LS-DYNA Options> Contact**.

El programa soporta tres tipos de contactos:

- Nodo a nodo
- Nodo a superficie
- Superficie a superficie
 - **Contacto de Superficie única (SS):** El contacto de superficie única se establece cuando una superficie de un cuerpo hace contacto ella misma o con la superficie externa de otro cuerpo. El programa determina automáticamente qué superficies del modelo van a entrar en contacto, luego funciona muy bien cuando las condiciones de contacto no son fáciles de predecir. Tiene la ventaja de resolver problemas con grandes deformaciones y no aumenta el tiempo computacional en casos explícitos, siendo una de sus desventajas aumentarlo cuando se trata de un caso implícito.
 - **Contacto Nodo a superficie (NTS):** El contacto nodo a superficie se produce cuando un nodo de la superficie de contacto de un cuerpo del modelo (Contact Surface) penetra en la superficie objetivo (Target Surface) de otro. Luego es necesario conocer de antemano y definir estas superficies. Se utiliza en procesos donde se producen grandes deformaciones, deslizamientos y diferentes tipos de malla entre los elementos a analizar. Consideraciones a la hora de definir las superficies:
 - Las superficies planas o cóncavas serán las objetivo y las convexas serán las de contacto.
 - Las superficies de mallado grueso serán las objetivo y las de mallado fino serán las de contacto.
 - **Contacto Superficie a Superficie (STS):** El algoritmo superficie-superficie establece contacto cuando la superficie de un cuerpo penetra en la de otro. Permite grandes deformaciones, no tiene restricciones en

cuanto a la geometría de las áreas en contacto y funciona muy bien con áreas de contacto relativamente grandes. Exige la definición de componentes nodales y partes para establecer las superficies de contacto y objetivo. Es muy eficiente en cuerpos que experimentan deslizamiento relativo, como un bloque que desliza en un plano.

Cada tipo de contacto necesita de un tipo específico de elemento de contacto. Se utilizará el tipo que es *Superficie a Superficie*, que permite modelizar un contacto entre un cuerpo rígido y otro flexible o entre cuerpos flexibles. El contacto entre superficies se establece cuando una superficie de un cuerpo penetra en la superficie de otro. Dentro de los 24 tipos de formas de contacto que contempla ANSYS LS-DYNA, se usará el contacto entre superficies automático. Normalmente se emplea cuando las caras de contacto tienen formas arbitrarias y áreas de contacto relativamente grandes.

5.10 Imposición de coacciones

El programa permite aplicar coacciones en el modelo. Usando el comando D, se puede aplicar coacciones solamente en los desplazamientos (UX, UY, UZ) y rotaciones (ROTX, ROTY, ROTZ) grados de libertad; el valor de las coacciones debe valer cero. En la GUI, se pica en **Main Menu>Solution>Constraints>Apply**

Para asegurar el modelo se ha decidido coaccionar la base de la matriz para evitar problemas. En realidad se podría especificar cualquier cara de la matriz como fija, puesto que la condición impuesta en Material Props fue que tanto la matriz como el punzón son infinitamente rígidos.

También se ha coaccionado la chapa mediante la restricción de los movimientos de sus cuatro aristas. Así conseguimos simular mejor el proceso real y evitar que la chapa tenga arrugas y que se quede pegada al punzón cuando se produzca la retirada de éste.

Esta condición junto con los grados de libertad coaccionados igualmente en el apartado Material Props es suficiente para resolver el modelo.

5.11 Imposición de cargas

En un análisis explícito dinámico, todas las cargas deben estar especificadas sobre el tiempo usando un componente o partes ID's, parámetros de array y el comando EDLOAD. En la GUI, las opciones de carga se encuentra en: **Main Menu>Solution>Loading Options>Specify Loads**. Una entrada básica para este comando es el nombre de un componente o número de parte y dos parámetros del array o una curva de carga con el número de identidad. La especificación del componente debe contener los nodos o los elementos en los cuales la carga es aplicada. La especificación de los parámetros del array contiene tiempo variando los datos de carga (un array para los valores de tiempo y otro para los correspondientes valores de carga; los dos array deben tener el mismo tamaño). Como alternativa al introducir los parámetros del array en el comando EDLOAD, se puede definir la curva de carga usando el comando EDCURVE (**Main Menu>Solution>Loading Options>Curve Options**) e introducir la curva de carga en EDLOAD. Las cargas válidas se muestran en la tabla de abajo.

Tabla 1– Tabla de tipo de cargas

Load Type	Label
Displacements	UX,UY,UZ
Rotations	ROTX,ROTY,ROTZ
Forces	FX,FY,FZ
Moments	MX,MY,MZ
Velocities	VX,VY,VZ
Accelerations (on nodes)	AX,AY,AZ
Base Accelerations	ACLX,ACLY,ACLZ
Angular Velocities	OMGX,OMGY,OMGZ
Temperature	TEMP
Pressures (applied to elements)	PRESS
Displacements on Rigid Bodies	RBUX, RBUY, RBUZ
Rotations on Rigid Bodies	RBRX, RBRy, RBRZ
Velocities on Rigid Bodies	RBVX, RBVY, RBVZ
Forces on Rigid Bodies	RBFX, RBFY, RBFZ
Moments on Rigid Bodies	RBUX, RBUY, RBUZ
Angular Velocities on Rigid Bodies	RBOX, RBOY, RBOZ

Carga para LS-DYNA es cualquier acción aplicable sobre un cuerpo, no sólo una fuerza. Es decir, carga para LS-DYNA es un desplazamiento, una rotación, fuerza, momentos, velocidades, aceleraciones, temperaturas o presiones aplicada a un cuerpo del modelo.

Para el caso de la primera embutición, la primera columna de la tabla contendrá los datos relativos al tiempo de simulación, mientras que la segunda columna de datos contendrá el desplazamiento asociado al punzón. Se ha construido una tabla aquí para facilitar la comprensión de los datos que se han introducido en el array. Se ponen los de la *embutición* y los del *primer paso* de la *estampación* porque lo que se moverá en el *segundo paso* de la *estampación* será la matriz.

- **Embutición**

Tabla 2– Desplazamiento del punzón en la embutición

Tiempo(s)	Desplazamiento(mm)
0	0
0.25	-1
0.50	-3
0.75	-5
1	0

- **Estampación**

Tabla 3– Desplazamiento del punzón en el primer paso de la estampación

Tiempo(s)	Desplazamiento(mm)
0	0
0.25	-19
0.50	-38
0.75	-57
1	-76
1.25	-57
-1.5	-38
1.75	-19
2	0

Se puede definir la curva de desplazamiento con toda la exactitud que se desee siempre que se puedan extraer los datos de desplazamiento del punzón en su tiempo preciso. Si no se necesita mucha exactitud no hay problema porque ANSYS interpolará los datos necesarios para realizar la simulación.

Se debe aclarar que la tabla especificada contiene los tiempos de inicio y final del movimiento del punzón pero estos no son necesariamente los tiempos iniciales y finales de la simulación.

5.12 Control del tiempo y de la salida de datos

El tiempo de la simulación se controlará con el comando **TIME** y los de salida de datos con los comandos que se especifican más abajo.

- **Controles de tiempo (Time Controls)**

El tiempo de duración de la simulación, que no tiene por qué coincidir con el del proceso, se controla con esta opción del programa. En ocasiones, sobre todo cuando la simulación tarda mucho en realizarse y no siendo necesario, por ejemplo, simular la retirada completa del punzón, se puede introducir un tiempo de duración del proceso menor para calcular sólo la parte que interesa.

- **Main Menu>Solution>Time Controls>Specify Solution Time**

- **Controles de Salida (Output Controls)**

Desde esta opción del programa, se puede controlar la frecuencia de generación de ciertos archivos de salida del programa, como puede ser:

- Esta opción especifica el número de resultados escritos en el archivo en el archivo Jobname.RST [comando **EDRST**]
- Especificar el Intervalo tiempo-histórico de salida [comando **EDHTIME**].
- Frecuencia de generación de los archivos “dump” para los futuros “Restart Analysis” [comando **EDDUMP**].

A los tres comandos desde la interfaz se llega de la siguiente forma:

- **Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq**

5.13 Mallado adaptativo

Se va a explicar cómo se aplica el mallado adaptativo y cómo se controla todo el proceso de éste. La mayoría de las opciones para el control no serán utilizadas pero se hará una explicación breve de todas.

En los análisis de conformación de metales y en los impactos de alta velocidad, un cuerpo podría experimentar una gran cantidad de deformación plástica. Un único punto de integración de los elementos, los cuales son generalmente robustos para largas deformaciones, podría dar imprecisión en el resultado en estas situaciones debido a un inadecuado punto de vista de las relaciones de los elementos. Para neutralizar este problema ANSYS LS-DYNA tiene la habilidad de remallar automáticamente una superficie durante un análisis para mejorar su integridad. Esta capacidad, conocida como mallado adaptativo, se controla con los comandos EDADAPT y EDCADAPT.

El comando de EDADAPT activa el mallado adaptativo dentro de una PART ID. (Usa el comando EDPART para crear una lista validando PART IDs). Por ejemplo, para activar el mallado adaptativo para la PART ID #1, se debe escribir el siguiente comando:

EDADAPT, 1, ON

Nota.- El mallado adaptativo es válido solamente para partes que son elementos de SHELL 163.

Cuando la adaptabilidad está activada para una parte, la malla para esta parte será automáticamente regenerada durante un análisis para asegurar una adecuada relación de los elementos y son mantenidos en todo el proceso de deformación. El mallado adaptativo es más comúnmente usado en los análisis de procesos de grandes deformaciones tales como la conformaciones de metales (mallado adaptativo es normalmente usado para blank). Para activar el mallado adaptativo para más de una parte dentro del modelo, se debe restablecer el comando EDADAPT para cada diferente PART ID. Por defecto, el mallado adaptativo está desactivado para todas las partes dentro del modelo

Más tarde, especificando qué partes será malladas adaptativamente, se debe también definir los parámetros del mallado adaptativo usando el comando EDCADAPT que coloca globalmente las opciones de control de todas las PART IDS que están para ser malladas de este modo como se definió por el comando EDADAPT. Los parámetros controlados por el comando EDCADAPT están definidos justo abajo:

- **Frecuencia (FREQ)-** Es el intervalo de tiempo el cual se llevará a cabo el mallado adaptativo. Por ejemplo, si se pone FREQ de 0.01, los elementos se remallarán adaptativamente cada .01 segundos (suponiendo que la unidad tiempo es el segundo) si están por encima del ángulo de tolerancia especificado. El valor por defecto para la FREQ es 0.0, este campo debe ser especificado cuando se use mallado adaptativo en el análisis.
- **Tolerancia del ángulo (TOL)-** Es el ángulo de tolerancia adaptativo (en grados) para el cual el mallado adaptativo se producirá. (por defecto=1e31). El campo de TOL controla la parte de relación de los elementos y es muy importante para asegurar precisión en los resultados. Si el ángulo relativo entre elementos supera el valor especificado en TOL los resultados automáticamente se refinarán.
- **Opción de adaptabilidad (OPT)-** Hay dos opciones de ángulos disponible para la adaptabilidad de la malla. Para OPT=1, el cambio de ángulo que se compara para el valor especificado de TOL se computa basado en la malla refinada previamente.
- **Niveles de refinamiento de la malla (MAXLVL)-** El campo de MAXLVL controla el número de veces que un elemento puede ser remallado durante el análisis. Para un único punto original, un MAXLVL de 1 podría permitir la creación de un elemento adicional, un MAXLVL de 2 podría permitir la creación de más de cuatro elementos de elementos adicionales y un 3 de MAXLVL permitiría la creación de más de 16 elementos nuevos. Altos valores de MAXLVL producirán resultados más precisos pero puede incrementar el tamaño del modelo.
- **Inicio y final del remallado (BTIME y DTIME)-** EL inicio y el final del remallado controla cuando el mallado adaptativo se activa y se desactiva. Por ejemplo, si se selecciona BTIME=.01 y DTIME=.1, el mallado adaptativo solamente tendrá lugar en el análisis entre .01 y .1 segundos (teniendo en cuenta que la unidad usada son los segundos).

- **Curva de intervalo de remallado (LCID)**- Esta curva de datos (especificada en el comando EDCURVE) define el intervalo de remallado en función del tiempo. La variable de las abscisas de la curva es el tiempo y en la ordena es el tiempo de intervalo de variación de remallado. Si esta opción es diferente de cero, la frecuencia para la cual se adapta (FREQ) será remplazada la curva de datos. Nota, sin embargo, se requiere un valor distinto de cero en el valor de FREQ para iniciar el primer ciclo de adaptabilidad.
- **Mínimo tamaño de elemento (ADPSIZE)**- El mínimo tamaño de elemento para ser adaptado se basa en la extensión del filo del elemento. Si este parámetro no se define, el tamaño del límite filo se ignora.
- **Opción de uno o dos en pase (ADPASS)**- If ADPASS =0, se usa la opción dos, y los cálculos se repiten después del remallado adaptativo (por defecto). Si ADPASS =1, se usa la opción uno y los cálculo no se repiten después del remallado.
- **Bandera de nivel de refinamiento uniforme (IREFLG)**- Valores de 1, 2, 3, etc. permiten 4, 16, 64 etc. elementos respectivamente para ser creados uniformemente para cada elemento original.
- **Bandera de penetración (ADPENE)**- Dependiendo de si el valor de *ADPENE* es positivo (aproximación) o negativo (penetración), el programa adaptará la malla cuando la superficie de contacto se aproxime o sea penetrada por la superficie de la herramienta según este valor. El refinamiento adaptativo de la herramienta se basa en la curvatura de la herramienta. Si *ADPENE* es positivo, el refinamiento generalmente se producirá antes de que el contacto tenga lugar si es posible usarlo (*ADPENE*=1).
- **Nivel de espesor de la placa (ADPTH)**- Nivel de espesor absoluto de la placa por debajo del cual la adaptabilidad debe empezar. Esta opción funciona solamente si ángulo de tolerancia (*TOL*) es distinto de cero. Si el remallado adaptativo basado en el espesor se desea sin cambio de ángulo, se debe elegir un ángulo grande. (Si *ADPTH*=0.0, esta opción no se usa).
- **Máximo nivel de elemento (MAXEL)**- Máximo número de elementos en el cual la adaptabilidad terminará. Adaptabilidad se para si el número de elementos es superado.

Para la mayoría de problemas se debería hacer un análisis inicial sin mallado adaptativo. Si los resultados el análisis inicial muestran una alta distorsión de la malla y si la solución parece ser incorrecta, entonces se puede rehacer el análisis con el mallado adaptativo activado. El mallado adaptativo puede ser también usado cuando el análisis de LS-DYNA termina con un error de “negative volumen element”.

Cuando el mallado adaptativo está activo, el número de elementos dentro del modelo cambiará durante la solución. Después de cada ciclo de adaptabilidad, la malla será actualizada y unos nuevos archivos de resultados serán escritos con la extensión *RSnn*, donde *nn* es el nivel de la malla adaptada. (Un ciclo adaptativo se producirá en cada incremento de tiempo especificado en *FREQ* o en los intervalos de tiempo especificados en *LCID*). Por ejemplo, un modelo que se remalle adaptativamente dos veces producirá dos archivos de resultados, *Jobname.RS01* y *Jobname.RS02*.

Nota.- Para cada ciclo se crearán nuevos archivos de resultados aunque la malla no cambie.

Se escriben también para cada ciclo una serie de archivos de resultados con la extensión *HI_{nn}*. Sin embargo, estos archivos pueden no ser útiles para el post-procesado como los archivos *RS_{nn}*. Además, LS-DYNA crea una serie de archivos de mallado adaptativo con una raíz en el nombre de “adapt”. Por tanto, no se debe usar “adapt” para el nombre de tu jobname cuando el mallado adaptativo es activo.

Como se ha comentado antes el mallado adaptativo consiste en subdivisión de los elementos del mallado para mejorar la precisión del resultado. El código de este método es prácticamente igual que el anterior hasta la serie de comandos que controlan el mallado adaptativo.

5.14 Salvar base de datos y resolver

Después de haber especificado todas las cargas y control de salida de datos, hay que salvar una copia de la base de datos con el nombre del archivo (con el comando **SAVE** o **Utility Menu>File>Save** as en la GUI). Después de esto, se empieza el cálculo de resultados (con el comando **SOLVE** o con **Main Menu>Solution>Solve**)

5.15 Vista de Resultados

Se puede ver los resultados de un análisis explícito dinámico usando **POST1**, el post procesador general. También se puede hacer con el **POST26**, el procesador con historial de tiempo.

- POST1 se usa para ver resultados sobre el modelo íntegro en puntos específicos de tiempo.
- A continuación, se ponen unos aspectos básicos para el post proceso de los resultados explícitos dinámicos
- La base de datos debe tener el mismo modelo para la cual la solución fue calculada.
- Deben estar disponibles los archivos de resultados (**Jobname.RST**) para POST1.
- Todas las tensiones y deformaciones en LS-DYNA es coordenadas globales para el sistema cartesiano. Sin embargo, si se está usando materiales compuestos, las tensiones pueden estar en coordenadas locales.

Capítulo 6

Simulaciones

6.1 Simulación del proceso de Embutición

6.1.1 Método del Mallado Fino

Este método es el más simple de los que se van a desarrollar en el proyecto. Es una embutición con un mallado adecuado (en este caso, bastante fino para tener precisión en los resultados) y que se realizará con la interfaz de ANSYS y que se ha definido en el capítulo anterior. Los pasos ya se han definido: se hace el mallado adecuado de las piezas y luego se realiza la simulación con los parámetros adecuados. Para esta simulación no se expondrán resultados porque esta parte no es realmente objeto de nuestro estudio. De todas formas, nos sirve como introducción para diseñar y comprender el código de simulación.

6.1.2 Código del Mallado Fino

!* Inicio del programa

```
/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 9.0  UP20041104    11:56:12  04/15/2010
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/REPLOT,RESIZE
```

!* Selección de preferencias el funcionamiento del programa

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
KEYW,LSDYNA,1
/GO
!*
/COM,
```

```
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural with LS-DYNA Explicit
```

!* Asignación del nombre a la base de datos

```
/FILENAME,embuticion_definitiva,0
```

!* Importación de la geometría creado en formato.igs

```
/AUX15
IOPTN,IGES,NODEFEAT
!*
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,'punzon1','igs','E:\Solids\'
VPLOT
!*
IOPTN,IGES,NODEFEAT
!*
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,'matriz1','igs','F:\Solids\'
VPLOT
!*
FINISH
```

!* Definición del tipo de elemento: SHELL 163

```
/PREP7
!*
ET,1,SHELL163
```

!* Definición de las constantes reales de los materiales

```
*SET,_RC_SET,1,
R,1
RMODIF,1,1,,0.001,,,
!*
*SET,_RC_SET,2,
R,2
RMODIF,2,1,,2,,,

```

!* Definición de las propiedades de los materiales

```
MP,DENS,1,7.8E-006
MP,EX,1,2.1E+005
MP,NUXY,1,0.3
TBDE,PLAW,1
```

```
TB,PLAW,1,,,1,
TBDAT,1,237
TBDAT,2,763
TBDAT,3,0
TBDAT,4,40
TBDAT,5,5
TBDAT,6,0.75
TBDAT,7,
```

```
EDMP,RIGI,2,6,7
MP,DENS,2,7.8e-6
MP,EX,2,2.1e5
MP,NUXY,2,0.3
EDMP,RIGI,3,7,7
MP,DENS,3,7.8e-6
MP,EX,3,2.1e5
MP,NUXY,3,0.3
```

!* Creación de la chapa

```
K,1,-45,0,-45,
K,2,45,0,-45,
K,3,45,0,45,
K,4,-45,0,45,
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
LSTR, 3, 4
LSTR, 4, 1
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
AL,P51X
!*
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,1
VGEN, ,P51X, , , ,3, , , ,1
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,1
AGEN, ,P51X, , , ,1.5, , , ,1
```

!* Mallado de los elementos

```
TYPE, 1
MAT, 1
REAL, 2
ESYS, 0
SECNUM,
!*
ESIZE,6,0,
MSHAPE,0,2D
```

```

MSHKEY,0
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,,,1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!*
ESIZE,5,0,
FLST,5,6,5,ORDE,2
FITEM,5,7
FITEM,5,-12
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 3
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!*
ESIZE,5,0,
FLST,5,11,5,ORDE,2
FITEM,5,18
FITEM,5,-28
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*

```

```

AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!* Creación de las partes

EDPART,CREATE

!* Contactos entre los cuerpos

EDCGEN,ASTS, 2, 1,0.2,0.8E-01,0,0,0, , , ,0,10000000,0,0
EDCGEN,ASTS, 1, 3,0.2,0.8E-01,0,0,0, , , ,0,10000000,0,0

!* Coacciones de la chapa y de la matriz

FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
!*
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,25
!*
/GO
DA,P51X,ALL,

!* Movimientos del punzón

*DIM,TIEMPO,ARRAY,5,1,1, , ,
*DIM,desplaza,ARRAY,5,1,1, , ,
*SET,TIEMPO(2,1,1) , 0.25
*SET,TIEMPO(3,1,1) , 0.50
*SET,TIEMPO(4,1,1) , 0.75
*SET,TIEMPO(5,1,1) , 1
!*
*SET,desplaza(2,1,1) , -1
*SET,desplaza(3,1,1) , -3
*SET,desplaza(4,1,1) , -5
*SET,desplaza(5,1,1) , 0

!* Definición de las cargas

EDLOAD,ADD,RBUY,0, 2,TIEMPO,DESPLAZA, 0, , , ,

FINISH
!* Tiempo de simulación y archivos de resultados
/SOL
TIME,1,
EDRST,20,
EDHTIME,100,

```

```
EDDUMP,1,  
/DSCALE,1,1.0  
/REPLOT
```

6.1.3 Comentario del código

Tabla 4– Comentario del código

Inicio del programa	
Se produce el inicio del programa con unos parámetro predeterminados	
<pre> /BATCH /COM,ANSYS RELEASE 9.0 UP20041104 11:56:12 04/15/2010 /input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1 /GRA,POWER /GST,ON /PLO,INFO,3 /GRO,CURL,ON /CPLANE,1 /REPLOT,RESIZE WPSTYLE,,,,,,,,0 </pre>	<p>Se puede ver cómo se inicia el programa, indicando la fecha y la hora.</p> <p>También se puede apreciar que el método gráfico esta activado.</p>
Comandos KEYW	
Estos comandos establecen el funcionamiento de ANSYS	
<pre> /NOPR /PMETH,OFF,0 KEYW,PR_SET,1 KEYW,PR_STRUC,1 KEYW,PR_THERM,0 KEYW,PR_FLUID,0 KEYW,PR_ELMAG,0 KEYW,MAGNOD,0 KEYW,MAGEDG,0 KEYW,MAGHFE,0 KEYW,MAGELC,0 KEYW,PR_MULTI,0 KEYW,PR_CFD,0 KEYW,LSDYNA,1 /GO !* /COM, /COM,Preferences for GUI filtering have been set to display: /COM, Structural with LS-DYNA Explicit </pre>	<p>Se puede ver que están con activos (valor 1) los modos Estructural y LS-DYNA.</p> <p>Esto último nos servirá para hacer el análisis explícito dinámico que estamos buscando en el proceso de embutición. Como se comentó anteriormente las simulaciones implícitas son para análisis estáticos.</p>

Nombre del archivo	
Establece el nombre de la base de datos	
/FILENAME,embuticion_definitiva,0	En este caso se le ha dado el nombre de “embutación_definitiva” a nuestra base de datos.

Importación de geometrías	
Este comando importa la geometría en formato ACIS (extensión igs)	
<pre> /AUX15 IOPTN,IGES,NODEFEAT !* IOPTN,MERGE,YES IOPTN,SOLID,YES IOPTN,SMALL,YES IOPTN,GTOLER,DEFA IGESIN,'punzon1','igs','E:\Solids\ VPLOT !* </pre>	<p>Con esta serie de comandos se importa la matriz. Se observan tres aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Está importada de la unidad 'F: ' - De la carpeta 'Solids' - El nombre del archivo importado es 'matriz1'
<pre> IOPTN,IGES,NODEFEAT !* IOPTN,MERGE,YES IOPTN,SOLID,YES IOPTN,SMALL,YES IOPTN,GTOLER,DEFA IGESIN,'matriz1','igs','E:\Solids\ VPLOT !* </pre>	<p>Con esta serie de comandos se importa el punzón. Se observan tres aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Está importada de la unidad 'F: ' - De la carpeta 'Solids' - El nombre del archivo importado es 'punzon1'

Tipos de elementos	
Se define el tipo de elemento que se va a utilizar en nuestro modelo	
<pre> /PREP7 !* ET,1,SHELL163 </pre>	<p>Shell 163. Es un elemento de 4 nodos.</p> <p>Este elemento tiene 12 grados de libertad en cada nodo: traslación, aceleración y velocidad en cada dirección nodal x, y y z y rotaciones sobre los ejes nodales x, y y z.</p>

Constantes Reales	
Se definen las constantes reales de los materiales	
*SET,_RC_SET,1, R,1 RMODIF,1,1,,0.001,,,,	Se puede observar que aquí se definen dos constantes: - Número de integraciones:1 - Espesor: en este caso es 0.001
SET,_RC_SET,2, R,2 RMODIF,2,1,,2,,,, !	Para la chapa se escogerá: - Número de integraciones:1 - Espesor: en este caso es 2

Propiedades de los materiales	
Se definen las propiedades de la placa (chapa) y de los dos rígidos (matriz y punzón)	
Placa	
MP,DENS,1,7.8e-6	Densidad de la placa
MP,EX,1,2.1e5	Módulo de Young
MP,NUXY,1,0.3	Módulo de Poisson
TB,PLAW,1,,,1, TBDAT,1,237	Fluencia
TBDAT,2,763	Módulo de tangencia
TBDAT,3,0	
TBDAT,4,40	Endurecimiento
TBDAT,5,5	Velocidad de deformación
TBDAT,6,0.75	Tensión de fallo.
TBDAT,7,	
Punzón	
EDMP,RIGI,2,6,7	Se puede ver que el material 2, que es el punzón, tiene restringido todos los movimientos excepto en el eje Y. Por esta razón es 6 en lugar de 7
MP,DENS,2,7.8e-6	Densidad de la punzón.
MP,EX,2,2.1e5	Módulo de Young
MP,NUXY,2,0.3	Módulo de Poisson
Matriz	
EDMP,RIGI,3,7,7	Para el material 3, que es la matriz, todos los movimientos están restringidos. En este caso si es 7
MP,DENS,3,7.8e-6	Densidad de la matriz
MP,EX,3,2.1e5	Módulo de Young,
MP,NUXY,3,0.3	Módulo de Poisson

Creación de la chapa	
Se crea la chapa con la interfaz de ANSYS debido a su simplicidad	
<pre> /PREP7 K,1,-45,0,-45, K,2,45,0,-45, K,3,45,0,45, K,4,-45,0,45, </pre>	Se crean Keypoints para la formación de la chapa. Se pueden hacer de varias formas, pero se ha preferido hacerlo dando las coordenadas de cada punto. De esta forma se conseguirá una chapa de 90x90 mm.
<pre> LSTR, 1, 2 LSTR, 2, 3 LSTR, 3, 4 LSTR, 4, 1 FLST,2,4, </pre>	Con los puntos creados anteriormente, se crean los bordes de la chapa que son líneas. Se crean uniendo los puntos 1, 2, 3 y 4 consecutivamente.
<pre> FITEM,2,1 FITEM,2,2 FITEM,2,3 FITEM,2,4 AL,P51X </pre>	Se crea el área definida por las cuatro líneas.

Mallado	
Se procede al mallado de cada elemento por separado	
Chapa	
<pre> !* TYPE, 1 MAT, 1 REAL, 2 ESYS, 0 SECNUM, !* ESIZE,2,0, MSHAPE,0,2D MSHKEY,0 !* CM,_Y,AREA ASEL,,,1 CM,_Y1,AREA CHKMSH,'AREA' CMSEL,S,_Y !* AMESH,_Y1 !* CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2 !* </pre>	<p>Se realizan los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se especifica el tipo de elemento que es 1 ya que se quiere que la chapa sea el SHELL163 - El número del componente (1) - El conjunto de constantes reales. - Sistemas de coordenadas. - Se elige el tamaño de los elementos de la malla. En nuestro caso es 2. Es bastante fino pero se necesita si queremos que los cálculos sean precisos ya que la chapa cambia de forma. - Las dimensiones del elemento. Al ser una chapa está en dos dimensiones. - Se selecciona el área que se quiere mallar que en nuestro caso es el área 1. - Los siguientes renglones en el código de la parte de mallado los crea ANSYS.

Punzón	
<pre> TYPE, 1 MAT, 2 REAL, 1 ESYS, 0 SECNUM, !* ESIZE,4,0, FLST,5,6,5,ORDE,2 FITEM,5,7 FITEM,5,-12 CM,_Y,AREA ASEL,,,P51X CM,_Y1,AREA CHKMSH,'AREA' CMSEL,S,_Y !* AMESH,_Y1 !* CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2 !* </pre>	<p>Se realizan los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Se especifica el tipo de elemento que es 1 ya que se quiere que la chapa sea el SHELL163 - El número del componente (2) - El conjunto de constantes reales. - Sistemas de coordenadas. - Se elige el tamaño de los elementos de la malla. En nuestro caso es 4 porque no se necesita tan fino ya que es un rígido y no va a cambiar la forma. - Las dimensiones del elemento. - Se selecciona el volumen que se quiere mallar que en nuestro caso es el volumen 2. - Los siguientes renglones en el código de la parte de mallado los crea ANSYS.
Matriz	
<pre> TYPE, 1 MAT, 3 REAL, 1 ESYS, 0 SECNUM, !* ESIZE,5,0, FLST,5,11,5,ORDE,2 FITEM,5,18 FITEM,5,-28 CM,_Y,AREA ASEL,,,P51X CM,_Y1,AREA CHKMSH,'AREA' CMSEL,S,_Y !* AMESH,_Y1 !* CMDELE,_Y CMDELE,_Y1 CMDELE,_Y2 !* </pre>	<p>Se realizan los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - El número del componente (3) - El conjunto de constantes reales. - Sistemas de coordenadas. - Se elige el tamaño de los elementos de la malla. En nuestro caso es 4 porque no se necesita tan fino ya que es un rígido y no va a cambiar la forma. - Las dimensiones del elemento. - Se selecciona el volumen que se quiere mallar que en nuestro caso es el volumen 1. - Los siguientes renglones en el código de la parte de mallado los crea ANSYS.

ID PARTS	
Se crean las diferentes ID PARTS	
EDPART,CREATE	Se crean las nuevas partes ID PARTS asignadas a los grupos de elementos que tienen una única combinación de conjuntos de números de material, tipo y <i>real constants</i> . En este caso no es necesario asignarlos manualmente y de esta forma se crean aleatoriamente.

Contactos entre cuerpos	
Se especifican los contactos que vamos a utilizar. En nuestro caso se utiliza el contacto superficie con superficie automático	
EDCGEN,ASTS, 2, 1,0.2,0.8E-01,0,0,0, , , , 0,10000000,0,0	STS significa que se ha utilizado la opción de <i>Automatic Surface to Surface</i> ya que para nuestro caso es la más fácil. En este comando se define el contacto entre las superficies del elemento 2(punzón) con el 1 (chapa). Se introducen los coeficientes más adecuados para este tipo de contactos y que se han obtenido en ensayos previos.
EDCGEN,ASTS, 1, 3,0.2,0.8E-01,0,0,0, , , , 0,10000000,0,0	En este comando se define el contacto entre el elemento 1(chapa) con las superficie del elemento 3 (matriz).

Coacciones	
Se ponen las coacciones que se indicaron en los capítulos de desarrollo del proyecto	
Área inferior de la matriz	
FLST,2,4,4,ORDE,2 FITEM,2,1 FITEM,2,-4 !* /GO DL,P51X, ,ALL,	Se coaccionan los movimientos de las líneas 1, 2, 3 y 4, que pertenecen al área 1 y por tanto, a la chapa de la que se parte para obtener la pieza deseada.
Chapa	
FLST,2,1,5,ORDE,1 FITEM,2,25 !* /GO DA,P51X,ALL,	Como la matriz es un rígido, aplicando la coacción a una sola área de ésta, se inmovilizará toda. En este caso se ha hecho para la base de la matriz que es el área 25.

Movimiento del punzón	
Para los movimientos del punzón se define el movimiento vertical del punzón mediante un array de tiempo y de desplazamiento	
*DIM,TIEMPO,ARRAY,5,1,1, , , *DIM,desplaza,ARRAY,5,1,1, , ,	Se está introduciendo los array. Una columna tendrá el nombre de 'TIEMPO' y el otro será para 'desplaza'. Con su nombre queda bastante claro para que se va a utilizar porque aquí se puede poner el nombre que se desee.
Columna de tiempos	
*SET,TIEMPO(2,1,1) , 0.25 *SET,TIEMPO(3,1,1) , 0.50 *SET,TIEMPO(4,1,1) , 0.75 *SET,TIEMPO(5,1,1) , 1	Se define la tabla de tiempos para los movimientos del punzón.
Columna de desplazamientos	
*SET,desplaza(2,1,1) , -1 *SET,desplaza(3,1,1) , -3 *SET,desplaza(4,1,1) , -5 *SET,desplaza(5,1,1) , 0	Ahora la tabla de desplazamientos del punzón. La tabla se ha detallado en los apartados anteriores.

Carga	
Se crea la carga que va a hacer que se mueva el punzón	
EDLOAD,ADD,RBUY,0, 2,TIEMPO,desplaza, 0, , , , ,	El movimiento del punzón se ejecuta por medio de la aplicación de una carga usando los datos de los array definidos en el bloque de comandos anteriores. En el comando se puede ver como la carga se produce para un movimiento en el eje Y, aplicado al elemento 2 y las variables son las TIEMPO y desplaza.

Tiempo	
Se puede definir el tiempo de simulación	
TIME,1,	Se especifica que se quiere un segundo en el tiempo de simulación.

Archivos de resultados	
Se controla la salida de datos de resultados	
EDRST,50,	Este comando especifica el número de pasos en que los resultados son escritos al archivo .rst. Por lo tanto, el intervalo de tiempo en el que se graban los resultados es TIME/EDRST (1/50)
EDHTIME,100,	Se especifica el intervalo de escritura en el archivo temporal (time-history)
EDDUMP,1,	Con éste, se especifica el número de archivos <i>d3dump</i> que se quiere para el restar. En LS/DYNA, el archivo de restart se especifica en términos de número de pasos de tiempo (time steps). Dado que el número de pasos no se conoce hasta que se llega a la solución, ANSYS calcula un número aproximado de time steps para la solución y luego usa el valor especificado en el comando EDDUMP para calcular la entrada de datos de LS/DYNA. Este número de time steps puede ser diferente del número total alcanzado cuando LS/DYNA llega a la solución. Por lo tanto, el número de archivos de volcado puede variar de los especificado en el comando EDDUMP.

Ajuste de escala	
Para ver los resultados correctamente se debe ajustar la escala	
<pre>/DSCALE,1,1.0 /REPLOT</pre>	<p>Con este comando se ajusta la escala para ver las animaciones y que se vea exactamente lo que pasa.</p>

6.1.4 Método del mallado adaptativo

Como ya se dijo en la primera parte del proyecto, con este método los procesos son prácticamente iguales hasta el punto de parametrizar el mallado adaptativo. Por esta razón, el código *será igual hasta la parte de mallado adaptativo*.

!* Inicio del programa

```
/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 9.0  UP20041104    11:56:12  04/15/2010
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/REPLOT,RESIZE
```

!* Selección de preferencias el funcionamiento del programa

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
KEYW,LS_DYNA,1
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural with LS-DYNA Explicit
```

!* Asignación del nombre a la base de datos

```
/FILENAME,embuticion_definitiva,0
```


!* Importación de la geometría creado en formato.igs

```
/AUX15
IOPTN,IGES,NODEFEAT
!*
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,'punzon1','igs','E:\Solids\'
VPLOT
!*
IOPTN,IGES,NODEFEAT
!*
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,YES
IOPTN,SMALL,YES
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,'matriz1','igs','E:\Solids\'
VPLOT
!*
FINISH
```

!* Definición del tipo de elemento: SHELL 163

```
/PREP7
!*
ET,1,SHELL163
```

!* Definición de las constantes reales de los materiales

```
*SET,_RC_SET,1,
R,1
RMODIF,1,1,,0.001,,,
!*
*SET,_RC_SET,2,
R,2
RMODIF,2,1,,2,,,,
```

!* Definición de las propiedades de los materiales

```
MP,DENS,1,7.8E-006
MP,EX,1,2.1E+005
MP,NUXY,1,0.3
TBDE,PLAW,1
TB,PLAW,1,,,1,
TBDAT,1,237
TBDAT,2,763
TBDAT,3,0
TBDAT,4,40
TBDAT,5,5
TBDAT,6,0.75
```

TBDAT,7,

EDMP,RIGI,2,6,7
 MP,DENS,2,7.8e-6
 MP,EX,2,2.1e5
 MP,NUXY,2,0.3
 EDMP,RIGI,3,7,7
 MP,DENS,3,7.8e-6
 MP,EX,3,2.1e5
 MP,NUXY,3,0.3

!* Creación de la chapa

K,1,-45,0,-45,
 K,2,45,0,-45,
 K,3,45,0,45,
 K,4,-45,0,45,
 LSTR, 1, 2
 LSTR, 2, 3
 LSTR, 3, 4
 LSTR, 4, 1
 FLST,2,4,4
 FITEM,2,1
 FITEM,2,2
 FITEM,2,3
 FITEM,2,4
 AL,P51X
 !*

FLST,3,1,6,ORDE,1
 FITEM,3,1
 VGEN, ,P51X, , , ,3, , , ,1
 FLST,3,1,5,ORDE,1
 FITEM,3,1
 AGEN, ,P51X, , , ,1.5, , , ,1

!* Mallado de los elementos

TYPE, 1
 MAT, 1
 REAL, 2
 ESYS, 0
 SECNUM,
 !*
 ESIZE,6,0,
 MSHAPE,0,2D
 MSHKEY,0
 !*
 CM,_Y,AREA
 ASEL, , , , 1
 CM,_Y1,AREA
 CHKMSH,'AREA'

```

CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 2
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!*
ESIZE,5,0,
FLST,5,6,5,ORDE,2
FITEM,5,7
FITEM,5,-12
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 3
REAL, 1
ESYS, 0
SECNUM,
!*
ESIZE,5,0,
FLST,5,11,5,ORDE,2
FITEM,5,18
FITEM,5,-28
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

!* Creación de las partes

EDPART,CREATE

!* Contactos entre los cuerpos

EDCGEN,ASTS, 2, 1,0.2,0.8E-01,0,0,0, , , ,0,10000000,0,0
EDCGEN,ASTS, 1, 3,0.2,0.8E-01,0,0,0, , , ,0,10000000,0,0

!* Coacciones de la chapa y de la matriz

FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-4
/GO
DL,P51X, ,ALL,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,25
/GO
DA,P51X,ALL,

!* Movimientos del punzón

*DIM,TIEMPO,ARRAY,5,1,1, , ,
*DIM,desplaza,ARRAY,5,1,1, , ,
*SET,TIEMPO(2,1,1) , 0.25
*SET,TIEMPO(3,1,1) , 0.50
*SET,TIEMPO(4,1,1) , 0.75
*SET,TIEMPO(5,1,1) , 1
!*
*SET,desplaza(2,1,1) , -1
*SET,desplaza(3,1,1) , -3
*SET,desplaza(4,1,1) , -5
*SET,desplaza(5,1,1) , 0

!* Definición de las cargas

EDLOAD,ADD,RBUY,0, 2,TIEMPO,DESPLAZA, 0, , , , ,
FINISH

!* Tiempo de simulación y archivos de resultados

/SOL
TIME,1,
EDRST,20,
EDHTIME,100,
EDDUMP,1,
/DSCALE,1,1.0
/REPLOT

!* Mallado adaptativo

/SOL
EDADAPT,1,1
EDCADAPT,0.1,0.5, 2,3,0,1, ,0,0,0,0,0,0,

Tabla 5– Comentario del código para el mallado adaptativo

Mallado adaptativo			
Se indica que parte se quiere mallar adaptativamente y optimiza los parámetros de este mallado			
EDADAPT,1,1	Con este comando se indica la ID Part en la que se quiere que se produzca mallado adaptativo		
EDCADAPT,0.1,0.5,2,3,0,1 , ,0,0,0,0,0,0,	FREQ	0.1	Indica que se produce el mallado adaptativo con un intervalo de 0.1
	TOL	0.5	Se va a producir el mallado cada vez que el ángulo de deformación cambie 0.5 grados
	OPT	2	El cambio de ángulo que se compara para el valor especificado de <i>TOL</i> se computa basado en la malla original.
	MAXLVL	3	Es el nivel de refinamiento de la mallado y el número 3 indica que se pueden crear hasta 16 elementos nuevos por cada elemento.
	BTIME	0	Es cuando se quiere que se empiece a producir el mallado
	DTIME	1	Es cuando se quiere que se termine el mallado
	El resto de variables son cero porque no influyen en nuestro objeto de estudio		

Los parámetros del mallado adaptativo que se pueden ver en la tabla y que se han utilizado en el código, han sido fruto varios esfuerzos:

- Se han acudido a ejemplos parecidos en los que se utiliza este tipo de mallado. [15]
- Hubo que ponerse en contacto con el autor de un vídeo publicado en la web y en el que se veía perfectamente cómo actuaba el mallado adaptativo. Nos proporcionó unos parámetros parecidos a los que finalmente se han utilizado. [16]
- Una vez teniendo estas fuentes en los que los procesos se realizaban correctamente, se fue probando hasta que salieron los resultados deseados y viables.

Después de introducir todo el código y antes de darle a resolver, el sistema montado completo tendrá este aspecto:

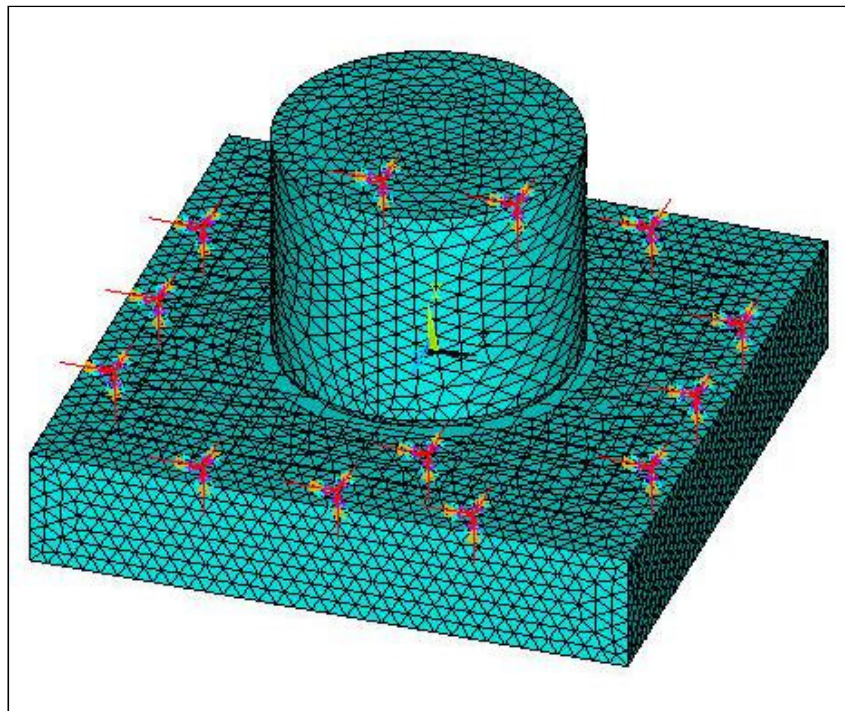


Figura 6.1– Sistema de montaje completo.

6.1.5 Resultados del Mallado Adaptativo

Para ver cómo se va produciendo el mallado adaptativo a lo largo del tiempo se debe seleccionar la opción de ‘File Range’ y poner el rango de archivos .RSnn que se

quieran ver en la animación. En la parte de abajo se seleccionará ‘DOF solution’ y ‘Deformed Shape’.

A continuación se muestran diferentes etapas del proceso según estos criterios. Para simplificar se van a mostrar un poco más de la mitad del tiempo total porque es cuando el punzón está bajando. Como se explicó anteriormente, cada vez que el programa realiza un mallado adaptativo, crea un archivo que está dividido en varios step. En las tablas se muestran esos steps y el tiempo de cada uno.

Tabla 6– Substeps en el paso 1°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS01	1	0.14997
	2	0.19998

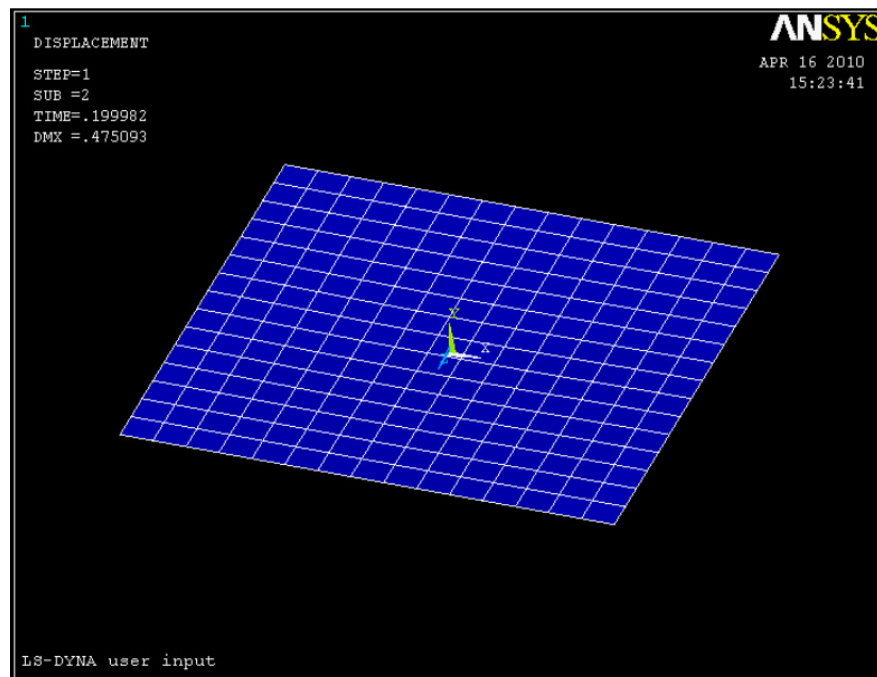


Figura 6.2– Mallado adaptativo en el paso 1°.

Tabla 7– Substeps en el paso 2°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS02	1	0.249999
	2	0.300000

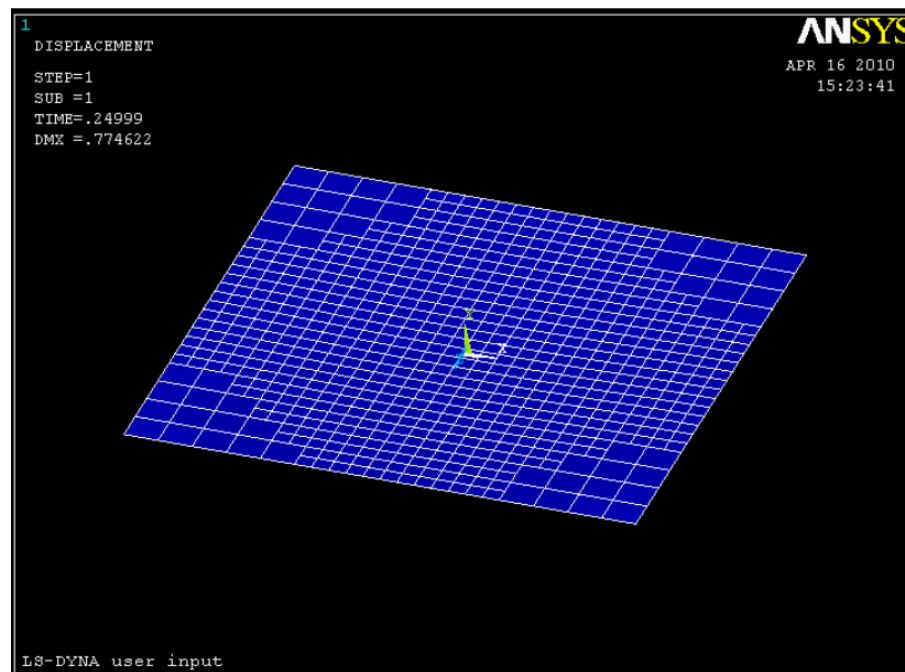


Figura 6.3– Mallado adaptativo en el paso 2°.

Tabla 8– Substeps en el paso 3°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS03	1	0.35000
	2	0.40000

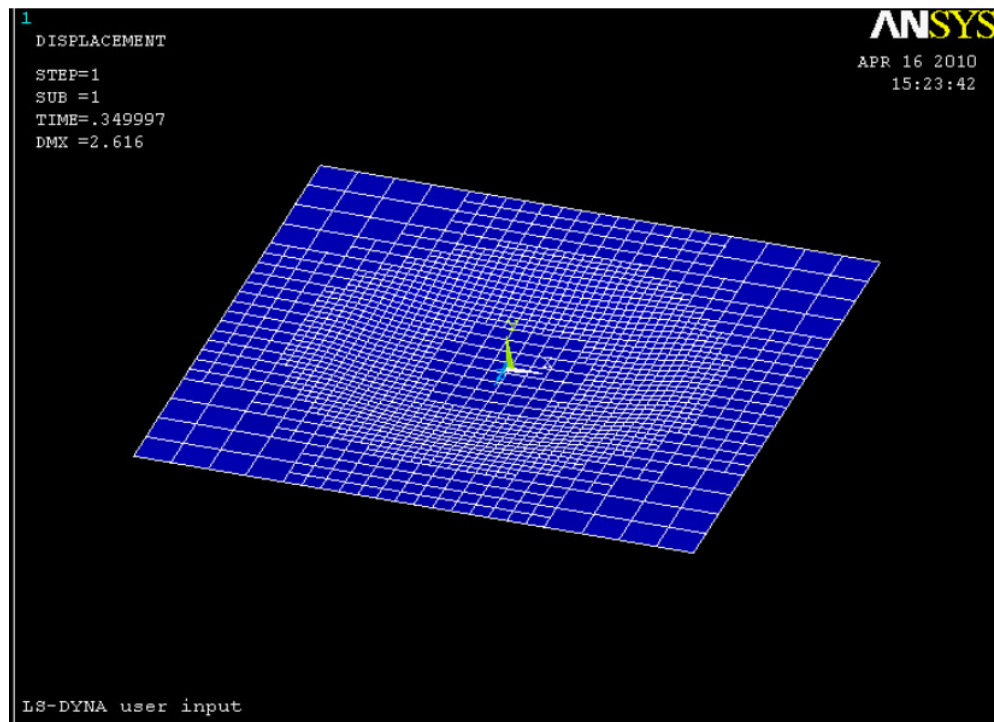


Figura 6.4– Mallado adaptativo en el paso 3°.

Tabla 9– Substeps en el paso 4°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS04	1	0.45000
	2	0.50000

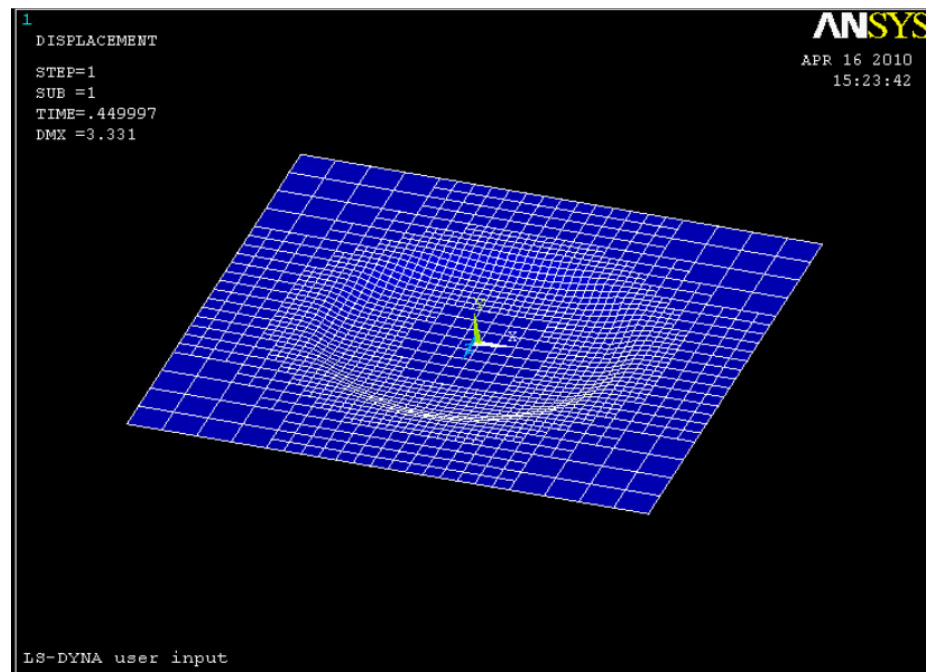


Figura 6.5– Mallado adaptativo en el paso 4°.

Tabla 10– Substeps en el paso 5°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS05	1	0.55000
	2	0.59000

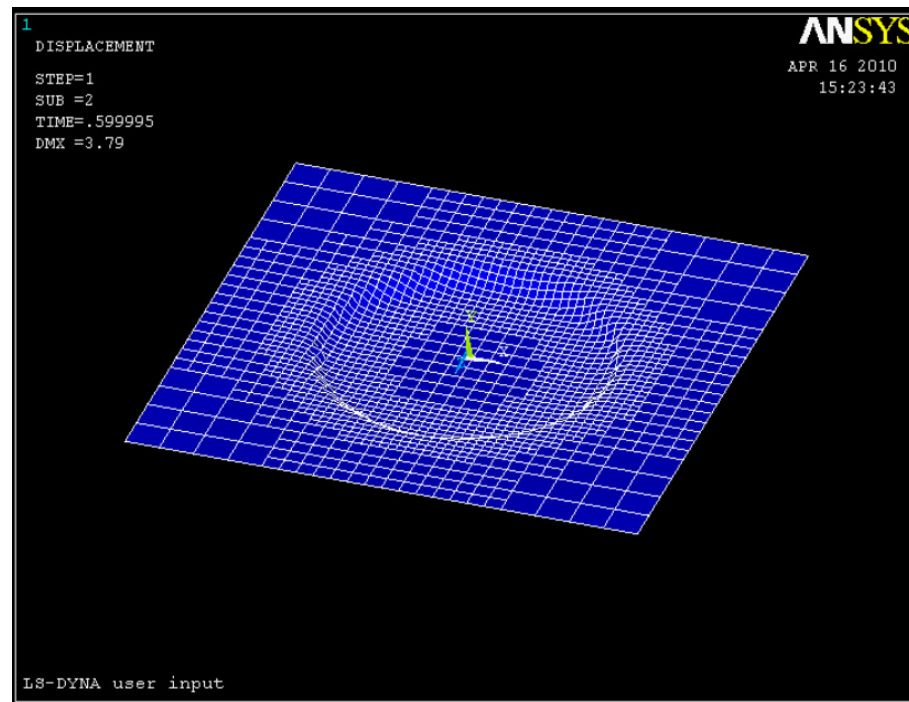


Figura 6.6– Mallado adaptativo en el paso 5°.

6.2 Simulación del Proceso de Estampación

En este proceso sólo se hará el proceso de mallado adaptativo ya que es complemento del mallado fino. Aunque en este proceso, se harán dos simulaciones ya que los límites de embutición no permiten desarrollarlo en uno sólo. Se harán los pasos que se han denominado PASO_0 y PASO_1.

Se va a explicar desde el entorno gráfico de ANSYS que es más gráfico que lo que se ha hecho hasta ahora.

6.2.1 Desarrollo del proyecto de estampación (PASO_0)

Se va explicar paso a paso lo que se ha ido haciendo para crear la simulación del proceso de estampación. Antes de ejecutar el programa se accede a un administrador de ANSYS para configurar algunas cosas tales como la carpeta donde se quiere que se creen todos los archivos. La aplicación de ANSYS para resolver nuestro caso, será LS-DYNA. Para abrir este administrador se realizan las siguientes acciones:

- Programas > ANSYS 9.0 > ANSYS Product Launcher

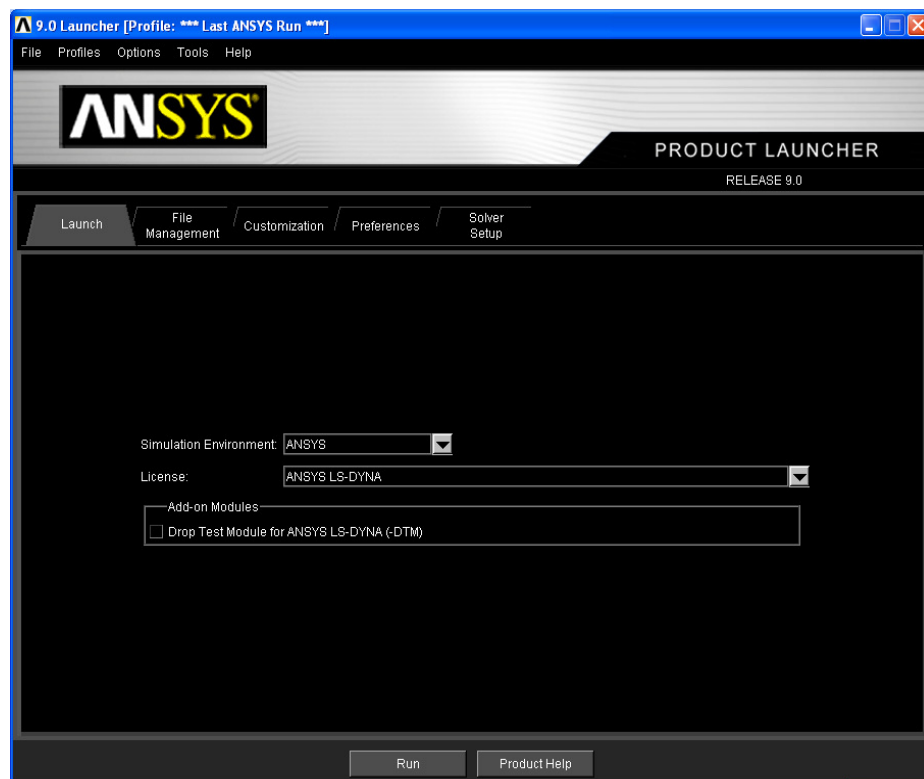


Figura 6.7– Elección del directorio para guardar datos de la simulación.

Se elegirán las opciones que se muestran en la fig.6.7 y se aprovechará para seleccionar la carpeta de destino para la creación de todos los archivos. Esto último se hará en el apartado de “File Management”. Para iniciar el programa, se pincha en “Run” y el programa se iniciará aunque para las siguientes veces utilizaremos el siguiente paso.

A partir de ahora, la opción elegida anteriormente se mantendrá invariable por lo que cada vez que se quiera acceder al programa, se debe abrir el programa normalmente.

- **Programas > ANSYS 9.0 > ANSYS**

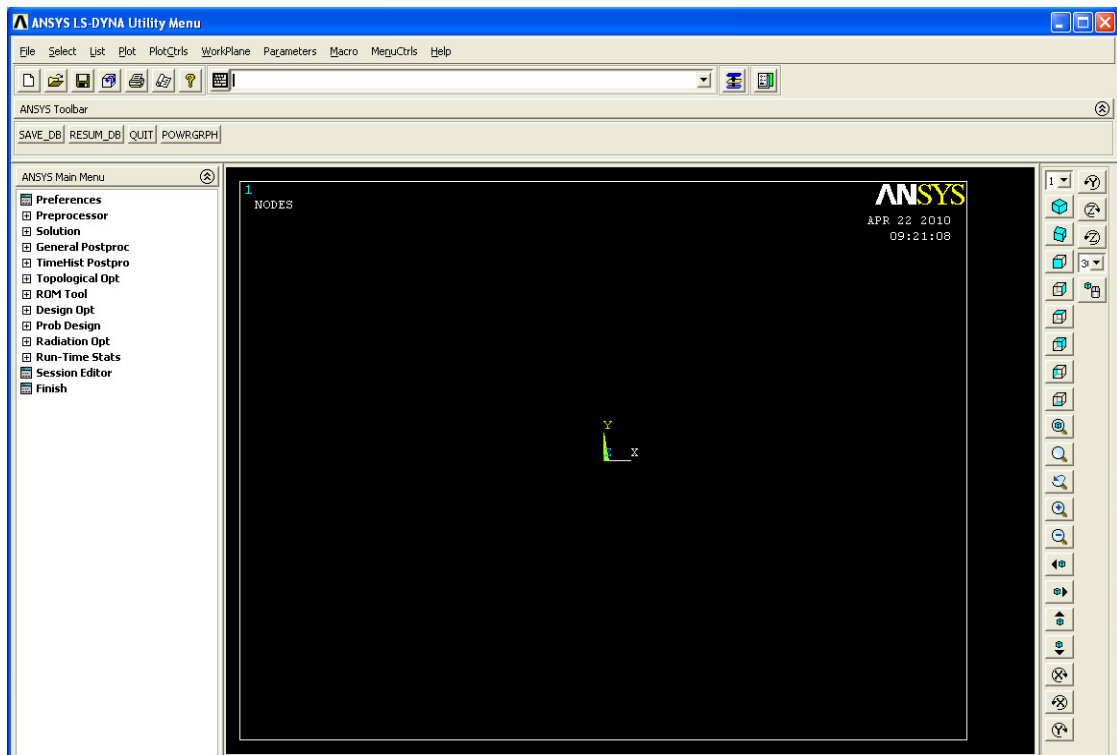


Figura 6.8– Aspecto del programa al iniciarlo.

Ahora se va a elegir el modo de resolución de nuestro proceso. Como tenemos un proceso de estampación y se quiere ver su evolución en el tiempo, se elegirá el modo de ‘Structural’ y en la parte de abajo, ‘LS-DYNA Explicit’ como se puede ver en la figura

- **ANSYS Main Menu > Preferences**

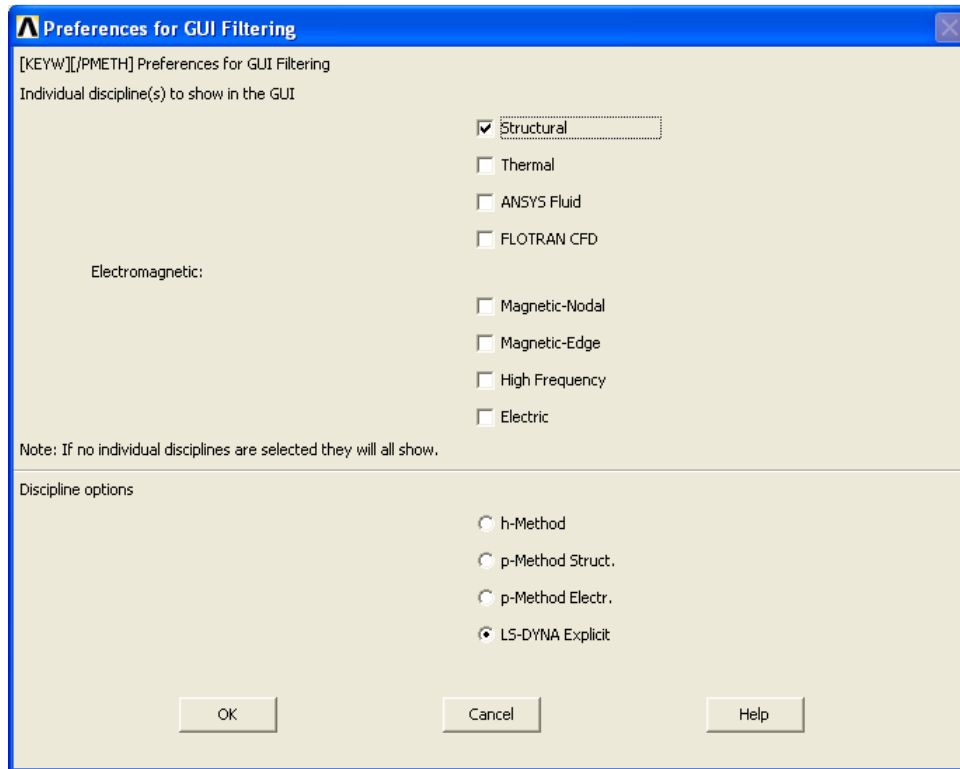


Figura 6.9– Selección del modo de resolución.

Se importan las geometrías que se han creado previamente en un programa más avanzado que ANSYS en este aspecto y que es el que es el CATIA. El formato de los archivos es IGES y los pasos a seguir son los siguientes:

- **ANSYS Utility Menu > Import > IGES > Conjunto_Etapa_0**

Al importar el archivo quedaría como se muestra en la figura. Se ha importado todo el conjunto del paso_0 para seguir con las coordenadas que se había utilizado al diseñar las geometrías.

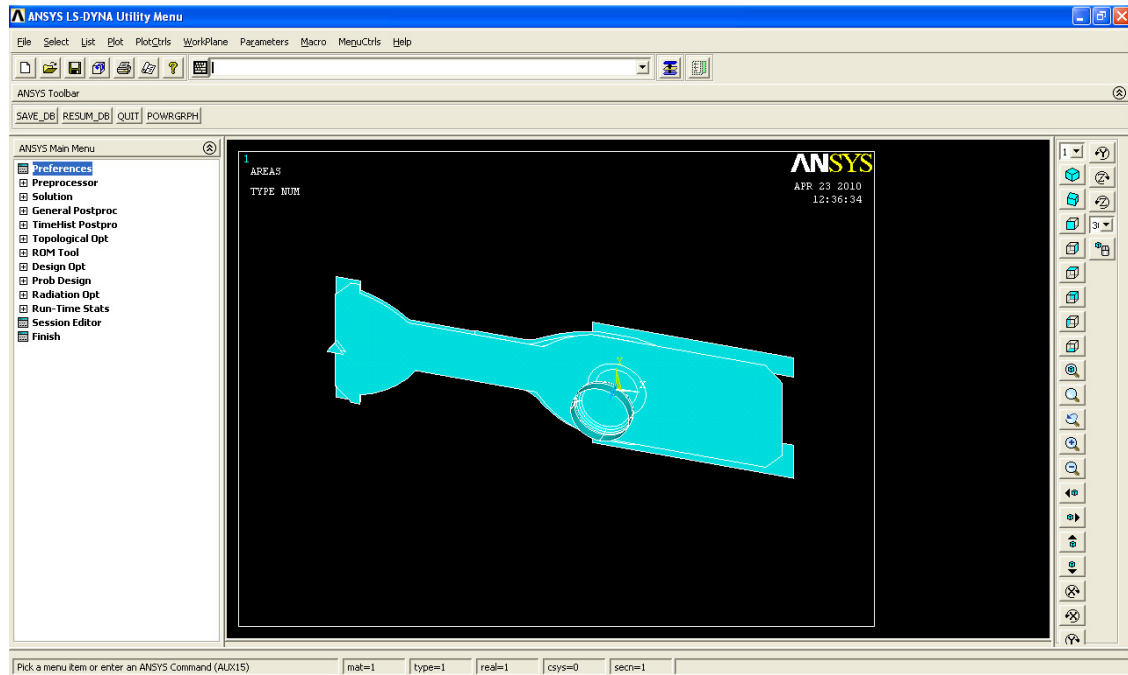


Figura 6.10– Conjunto del paso_0.

En principio, al importarlo, se ve lo que se ha mostrado en la figura anterior, pero con la barra de herramientas que se ve a la derecha se pueden modificar todas las vistas del conjunto en el momento que se quiera.

Se elige el tipo de material. Hay varias opciones tales como sólido, placa, viga... En nuestro caso se elegirá solo el SHELL 163 porque tanto como la chapa, como los materiales de utillaje los podemos considerar placas. Más tarde se seleccionará la placa como un material plástico y los demás como rígidos.

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > element type > add**

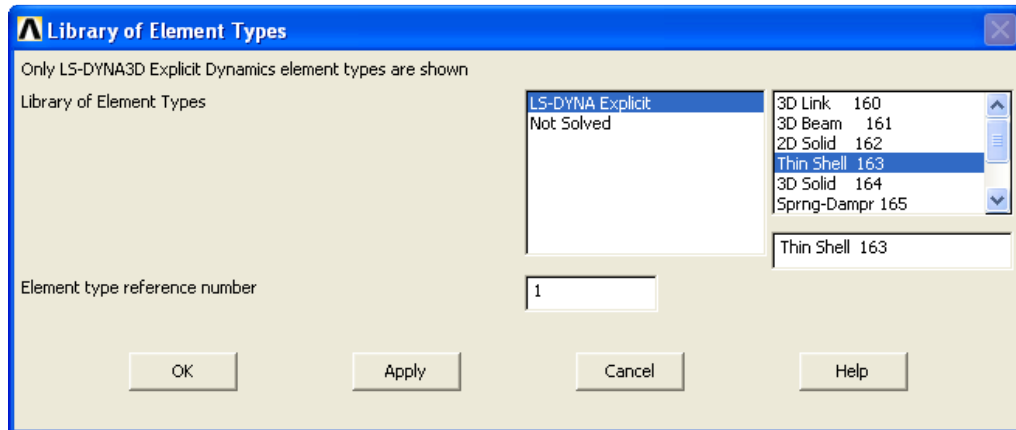


Figura 6.11– Tipología del material más óptimo para la simulación.

Ahora nos toca definir los tipos de constantes para el tipo de elemento (Shell163) que se ha elegido antes. En nuestro caso, se ha optado por crear dos tipos de constantes, uno para las herramientas y utillajes y otro para la chapa. Para herramientas el espesor de 0.001 mm y para la chapa el espesor de 2 mm.

- **ANSYS Main Menu>Preprocessor>real constants→add**

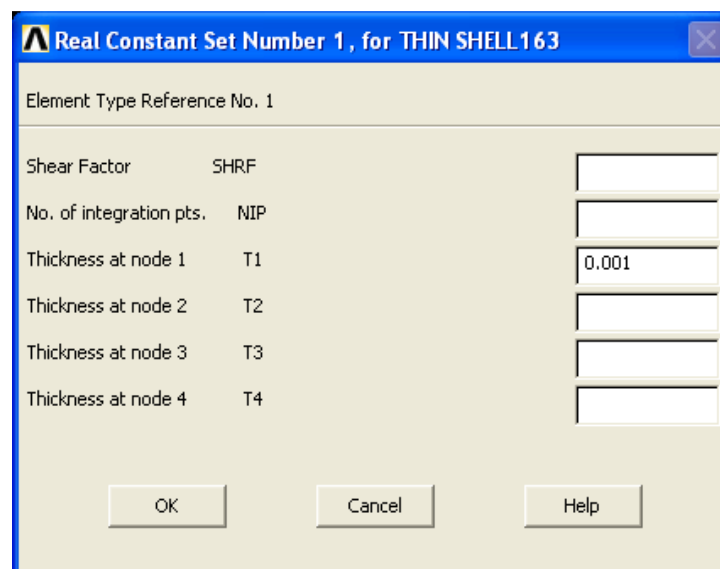


Figura 6.12– Espesor del material 1 (todos excepto la chapa).

En este paso, se crean los modelos de los materiales. Para facilitar los cálculos, se ha decidido crear seis materiales. En el conjunto se tiene el punzón, la matriz, la chapa, el pisa y dos áreas que se han creado para facilitarnos cálculos posteriores. Estarán definidos de la siguiente forma:

- **Material 1:** Placa (Plastic Kinematic).
 - **Material 2:** Matriz (Rigid).
 - **Material 3:** Pisa (Rigid).
 - **Material 4:** Punzón (Rigid).
 - **Material 5:** Área 1 (Rigid).
 - **Material 6:** Área 2 (Rigid).
-
- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models**

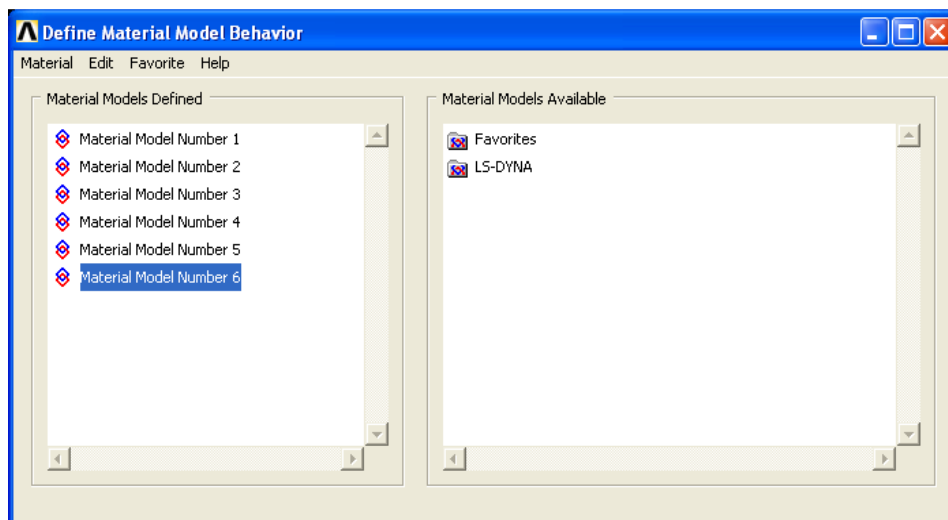


Figura 6.13– Definición del modelo de los materiales.

Ya se han creado los 6 materiales, ahora se deben definir cada uno. La chapa que será el que tenga más características se definirá así.

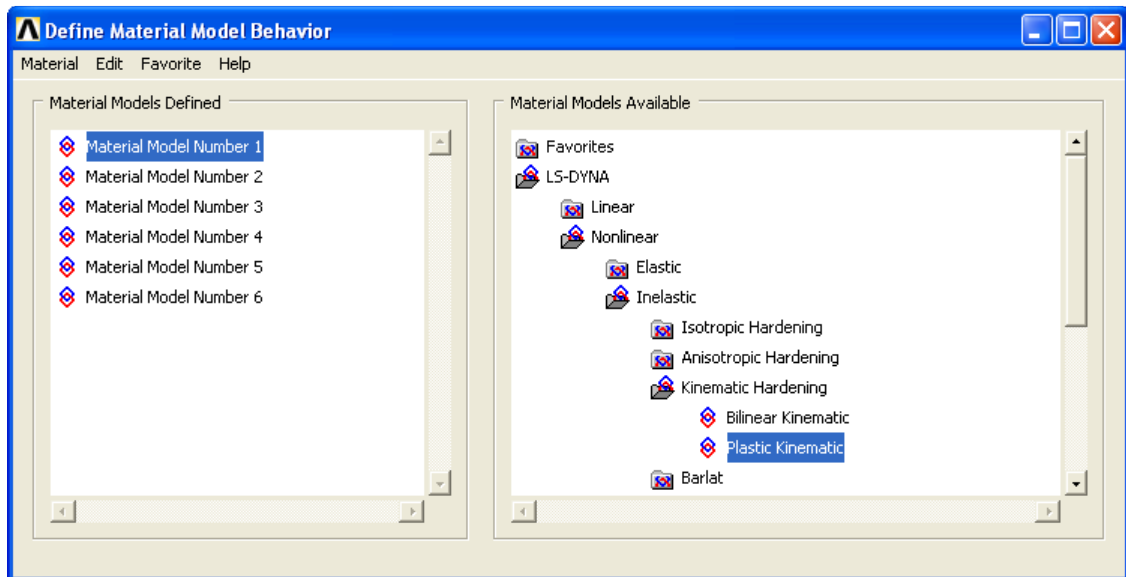


Figura 6.14– Definición del modelo del material para la chapa.

Con las siguientes propiedades: Densidad, módulo de Young, coeficientes de Poisson, límite de fluencia, módulo de tangencia y diferentes coeficientes del material.

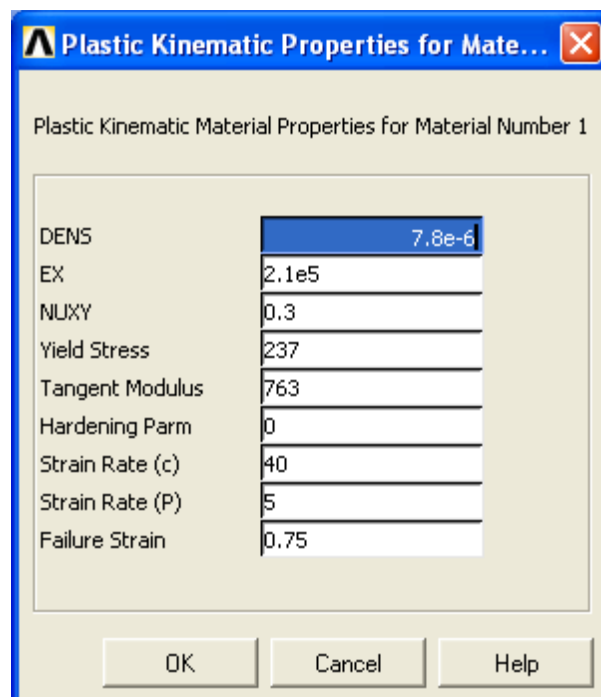


Figura 6.15– Definición de las propiedades la chapa.

Para el resto de materiales (todos excepto de la chapa y que son herramientas y utillajes) se seleccionarán las características de *rígidos*.

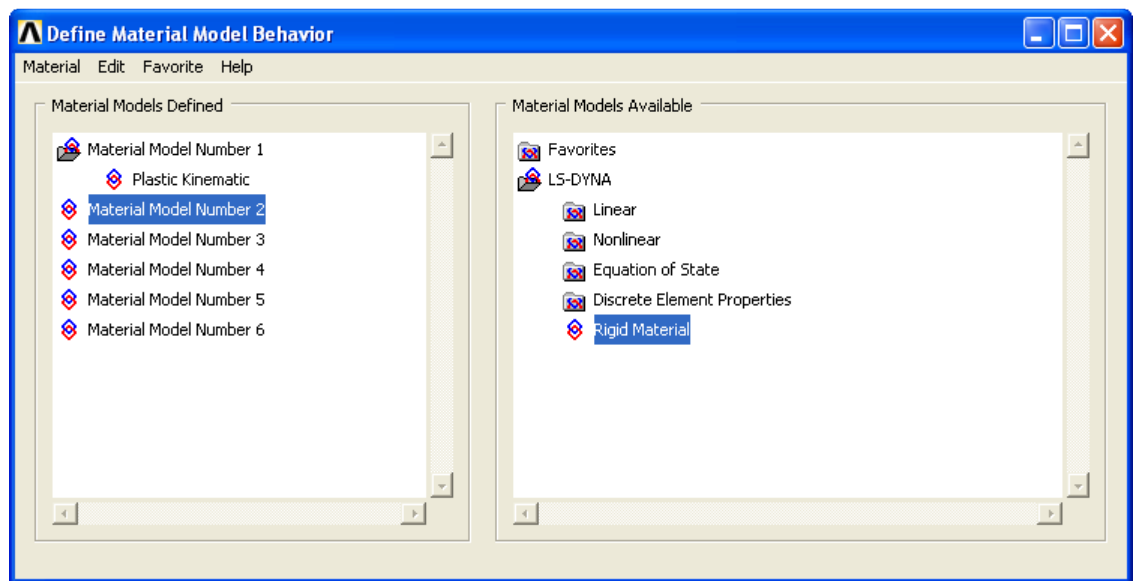


Figura 6.16– Elección de material rígido.

Se especifican las características del material. Hay que prestar especial atención a las coacciones de movimientos de traslación y rotación porque en este caso que es la matriz, sí debe coaccionarse todos, pero para el pisa y el punzón no se puede coaccionar el eje en el que queremos que se desplace.

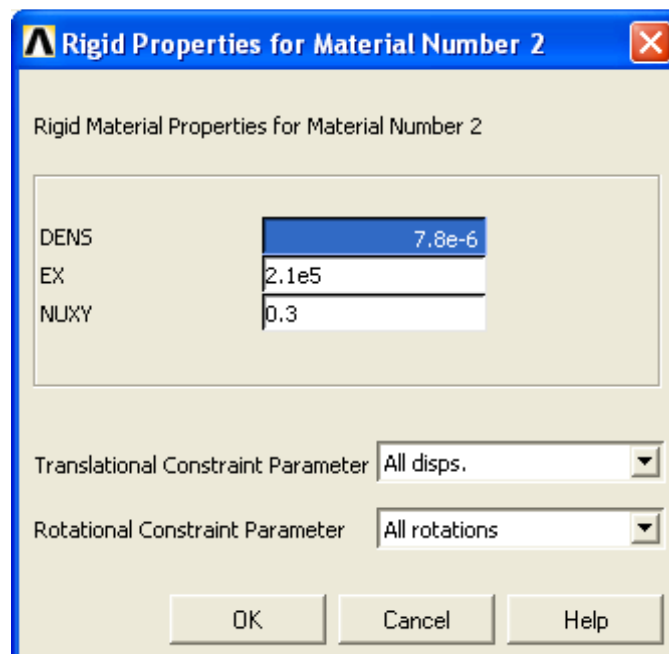


Figura 6.17– Definición de las propiedades de los materiales rígidos.

Se procede a una de las partes más importantes y que es el mallado de las áreas. Se hará distintos tamaños de mallado y se mallará en función de los tipos de materiales

y de los constantes de esos materiales. Con este mallado se consigue asociar los materiales a las distintas áreas que hemos creado geométricamente. En resumen sería:

Tabla 11–Resumen de los materiales para el paso_0.

	Nº de Material	Real constants	Tamaño de mallado	Áreas
Punzón	4	1	8	103-136
Pisa	3	1	10	88
Placa	1	2	6	1
Matriz	2	1	10	89-102
Área 1	5	1	10	87
Área 2	6	1	10	86

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool**

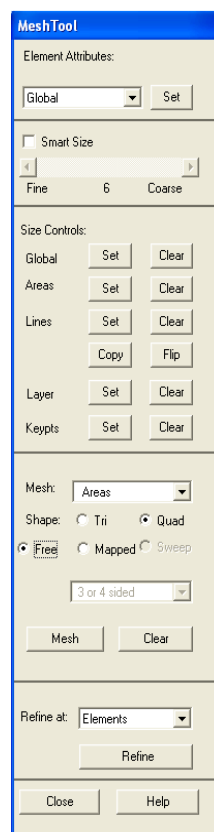


Figura 6.18– Cuadro de mando para el mallado de los diferente mallados.

Una vez mallados todas las áreas, se pasa a la creación de componentes a partir de elementos. Primero se eligen los nodos asociados a las áreas, y luego, se crean los componentes con una etiqueta con el nombre que se desee.

- **ANSYS Utility Menu > Select Entities > Areas by attributes > Material Number > OK**

Se seleccionan las áreas que se quieren para crear cada componente. Es en función del material por lo que se debe saber qué áreas pertenecen a cada elemento.

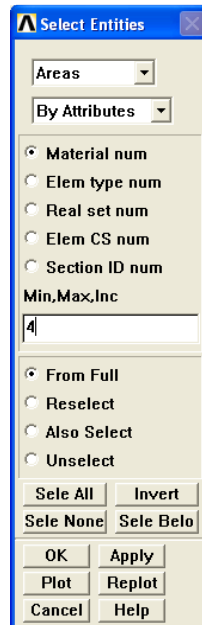


Figura 6.19– Cuadro de mando para la selección los elementos.

- **ANSYS Utility Menu > Select Entities > Nodes attached to Areas > OK**

Se cogen los nodos de esas áreas porque los componentes queremos que estén hechos de nodos.

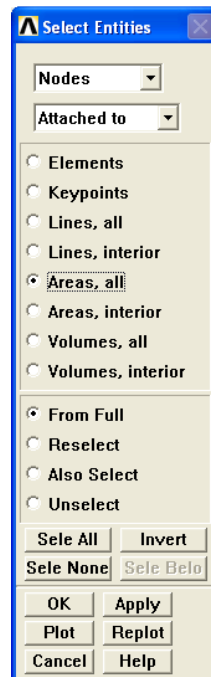


Figura 6.20– Cuadro de mando para la selección las áreas

- **ANSYS Utility Menu > Select > Comp/Assembly > Create Component**

Se crean los componentes. A cada uno se le da el nombre que se quiera.

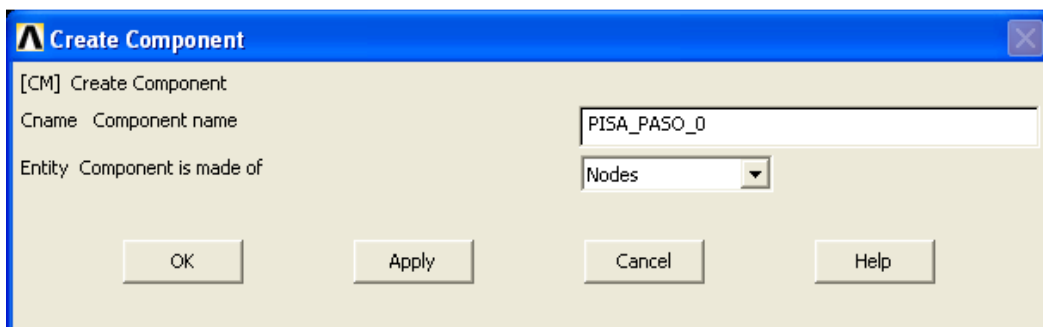


Figura 6.21– Asignación de los nombres a cada componente

Nota.- Hay que señalar que se deben hacer estos tres pasos seguidos para cada componente.

Una vez que tenemos los componentes, se crean las ID's Parts. Se pueden crear aleatoriamente todas las partes.

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > LS-DYNA Options > Parts Options**

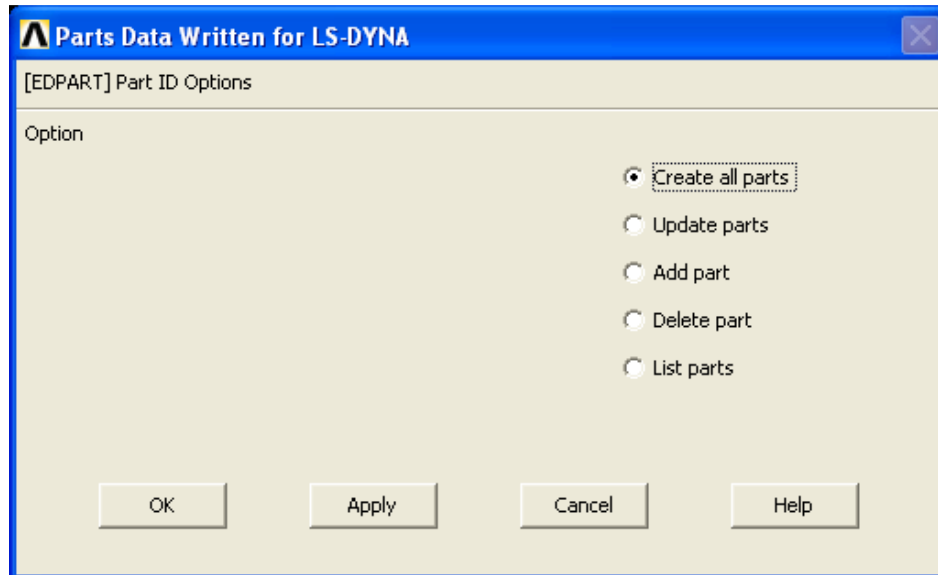


Figura 6.22– Creación de partes.

Cuando se elige esta opción, automáticamente sale una lista con las partes que se han creado aleatoriamente.

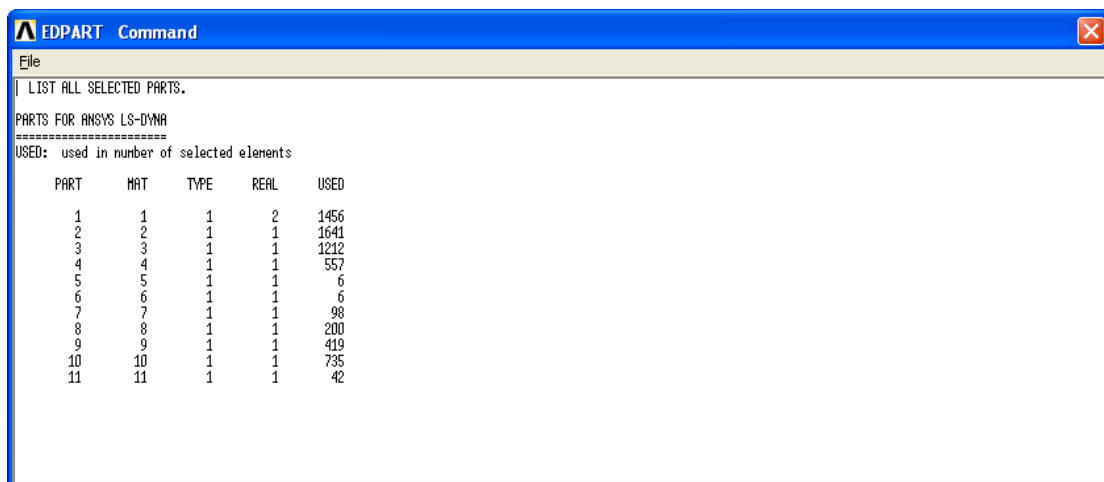


Figura 6.23– Ventana automática que nos muestra las parts.

Una parte muy importante es la asignación de contactos de las partes. Se elegirá el tipo de Surface to Surface y en el modo automático. También se debe incluir los coeficientes de fricción estática y dinámica para el acero lubricado.

Este tipo de contacto se define cuando la superficie de un cuerpo penetra en la de otro. Permite grandes deformaciones, no tiene restricciones en cuanto a la geometría de las áreas en contacto y funciona muy bien con áreas de contacto relativamente grandes. Exige la definición de componentes nodales y partes para establecer las superficies de contacto y objetivo. Es muy eficiente en cuerpos que experimentan deslizamiento relativo, como un bloque que desliza en un plano.

Hay que tener muy en cuenta las partes que se han creado anteriormente porque en la definición del contacto, nos pedirán las partes entre las que se quiera realizar el contacto.

- **ANSYS Main Menu >Preprocessor > Meshing > LS-DYNA Options > Contacts > Define Contact**

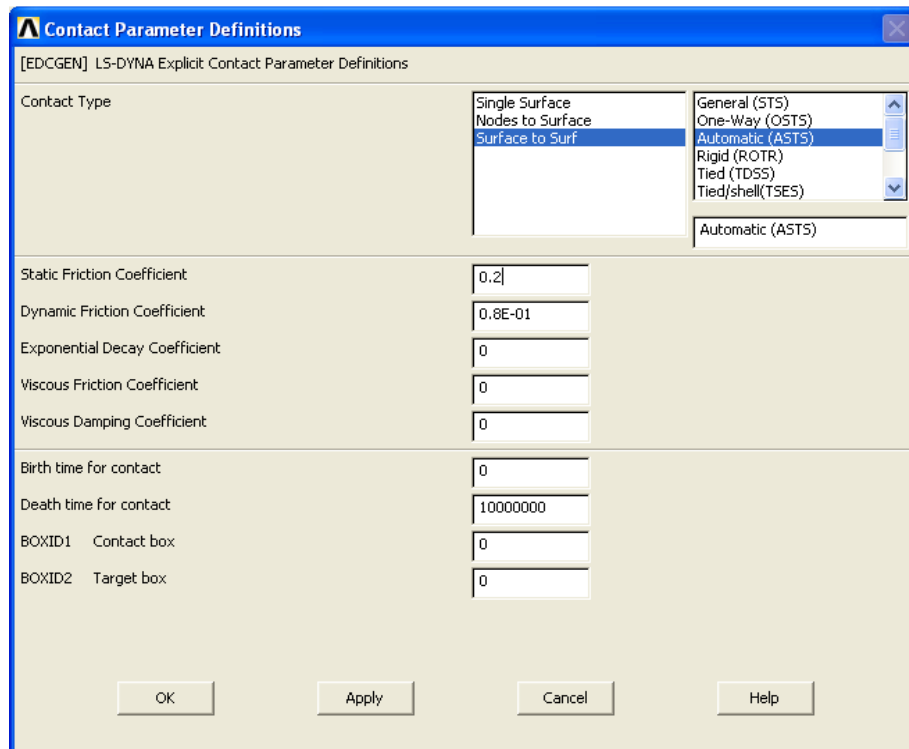


Figura 6.24– Definición de contactos

Antes de definir las cargas, se crearán los vectores de movimientos de los elementos. Serán en función del tiempo y serán para el movimiento del punzón, el pisa y la presión que debe ejercer el pisa. *Todos los vectores de movimiento podría resultar más fácil hacerlo introduciendo directamente los comandos.*

- **Utility Menu > parameters > array parameters > define/edit**

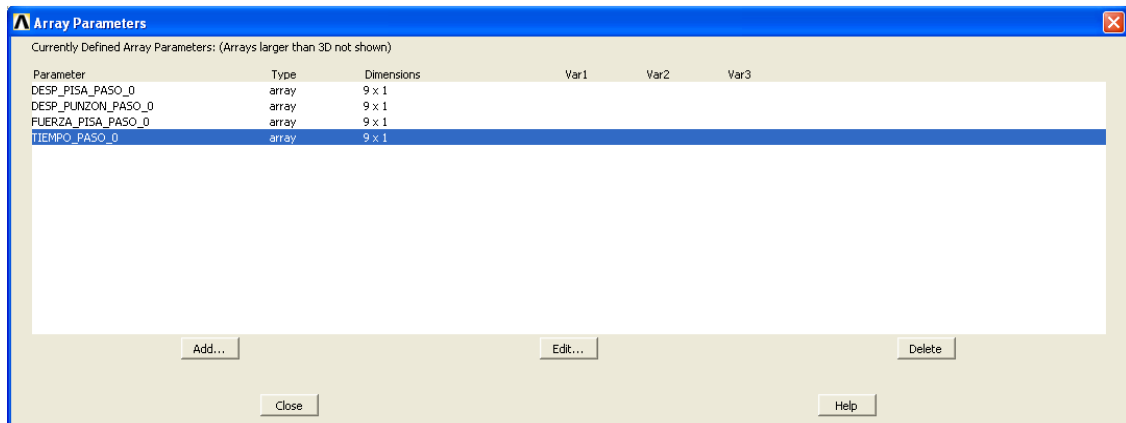


Figura 6.25– Creación de los vectores de movimiento (definición).

Dentro de este apartado se debe hacer la introducción de las coordenadas para los array que se han definido.

- **Utility Menu > parameters > array parameters > define/edit> edit**

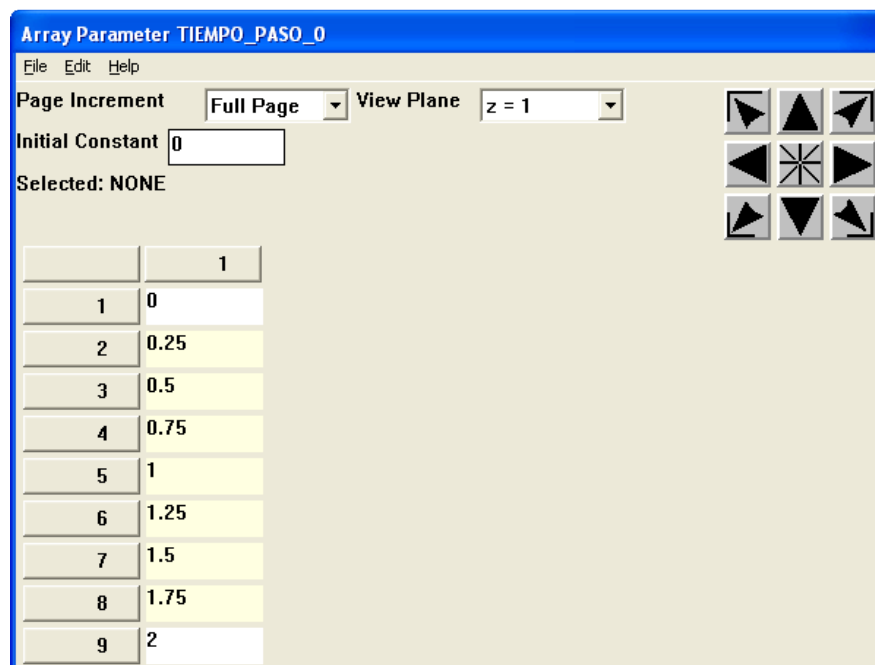


Figura 6.26– Creación de los vectores de movimiento (coordenadas).

Después de crear los vectores y de definirlos, es el momento de utilizarlos creando las cargas que se van a utilizar en el proyecto. Se aplicarán tres cargas pero de dos tipos diferentes. Dos serán de desplazamiento (RBUZ) y una de fuerza (RBFZ). En función de nuestro sistema de coordenadas la dirección de los movimientos y fuerzas se realizarán en el eje Z.

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads > Add Loads**

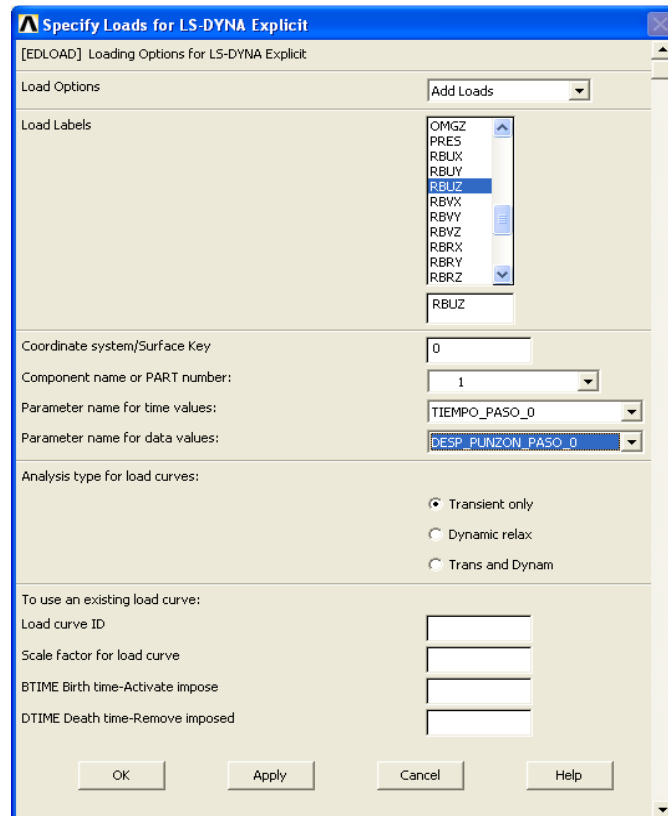


Figura 6.27– Definición de cargas.

Ahora es el momento de configurar una de las partes más importantes de este proyecto: **mallado adaptativo**. Primero se selecciona la parte en la que se quiere este tipo de mallado (en nuestro caso la placa es la parte 1) y en el siguiente paso se parametriza este mallado en función de varias variables que se expusieron detalladamente en el capítulo 5. La mayoría de estas opciones no se necesitan porque nuestro análisis tiene un grado de complejidad medio. Si se quisiera ser mucho más exhaustivo se podría configurar con mucha más exactitud.

Tabla 12– Tabla con los parámetros de mallado adaptativo.

<i>FREQ</i>	Frecuencia
<i>TOL</i>	Tolerancia del ángulo
<i>OPT</i>	Opción de adaptabilidad
<i>MAXLVL</i>	Niveles de refinamiento de la malla
<i>BTIME</i>	Inicio del mallado
<i>DTIME</i>	Final del mallado
<i>LCID</i>	Curva de intervalo de mallado
<i>ADPSIZE</i>	Mínimo tamaño de elemento
<i>ADPASS</i>	Opción de uno o dos en Pass
<i>IREFLG</i>	Bandera de nivel de refinamiento uniforme
<i>ADPENE</i>	Bandera de penetración
<i>ADPTH</i>	Nivel de espesor de la placa
<i>MAXEL</i>	Máximo nivel de elemento

- **ANSYS Main Menu > Solution >Analysis Options > Adaptive Meshing> Apply to part**

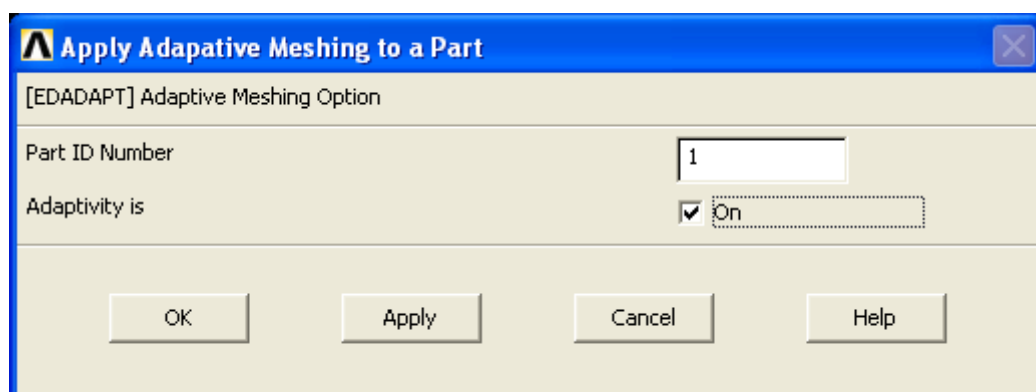
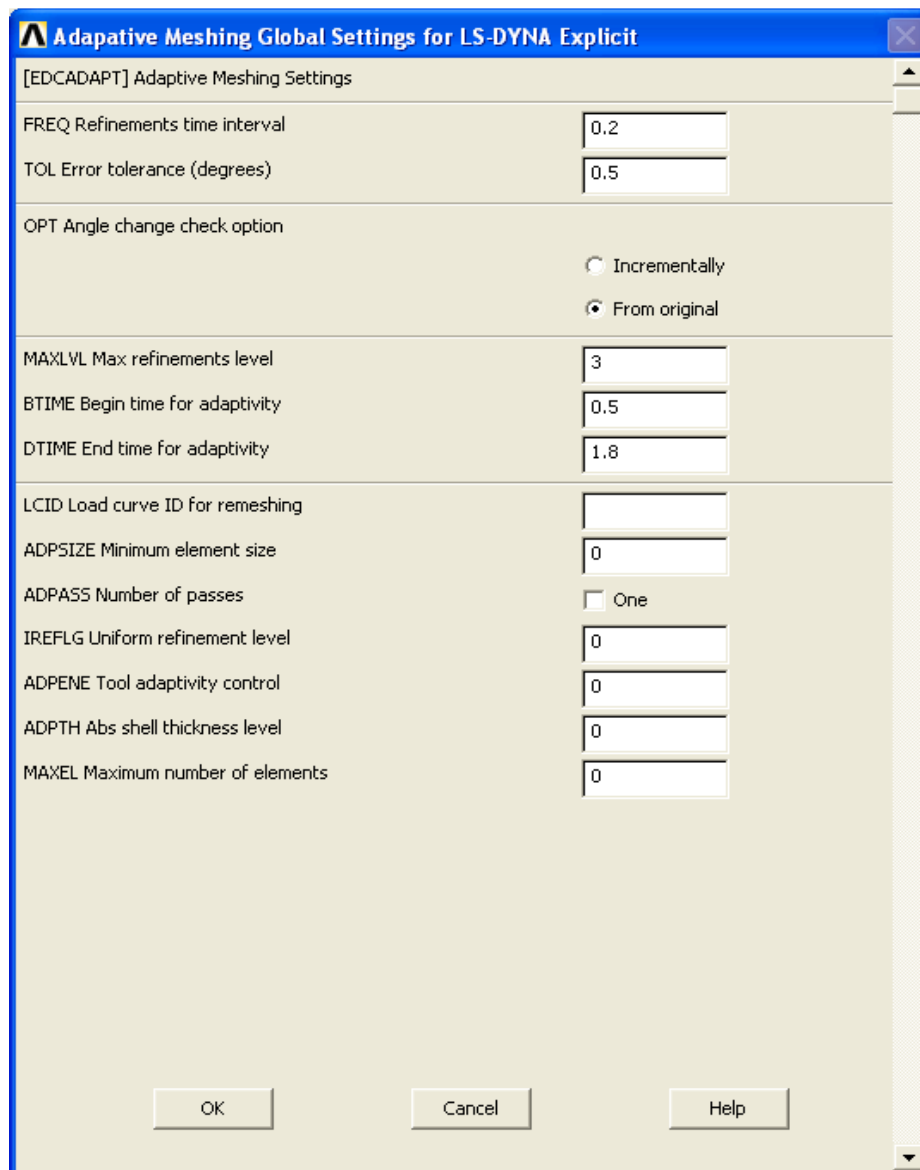


Figura 6.28– Mallado Adaptativo.

**ANSYS Main Menu > Solution >Analysis Options > Adaptive Meshing>
Global Settings**



Adaptive Meshing Global Settings for LS-DYNA Explicit

[EDCADAPT] Adaptive Meshing Settings

FREQ Refinements time interval	0.2
TOL Error tolerance (degrees)	0.5
OPT Angle change check option	<input type="radio"/> Incrementally <input checked="" type="radio"/> From original
MAXLVL Max refinements level	3
BTIME Begin time for adaptivity	0.5
DTIME End time for adaptivity	1.8
LCID Load curve ID for remeshing	
ADPSIZE Minimum element size	0
ADPASS Number of passes	<input type="checkbox"/> One
IREFLG Uniform refinement level	0
ADPENE Tool adaptivity control	0
ADPTH Abs shell thickness level	0
MAXEL Maximum number of elements	0

OK Cancel Help

Figura 6.29– Parametrización del mallado adaptativo.

También se debe especificar el tiempo de simulación deseado. El primer paso de la estampación se completará en 2 segundos.

- **ANSYS Main Menu > Solution >Analysis Options > Time Controls> Solution Time**

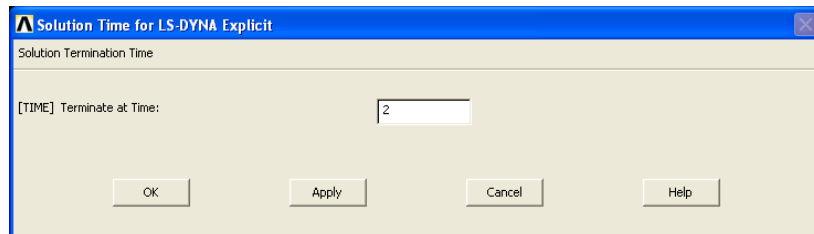


Figura 6.30– Tiempo de simulación.

Antes de resolver el proceso se deben seleccionar el número de pasos de escritura de los datos de salida (almacenamiento de datos de salida). En el proceso de embutición se definieron con detalle en qué consisten la generación de éstos.

- **ANSYS Main Menu > Solution >Output Controls > File Output Frequency> number of steps**

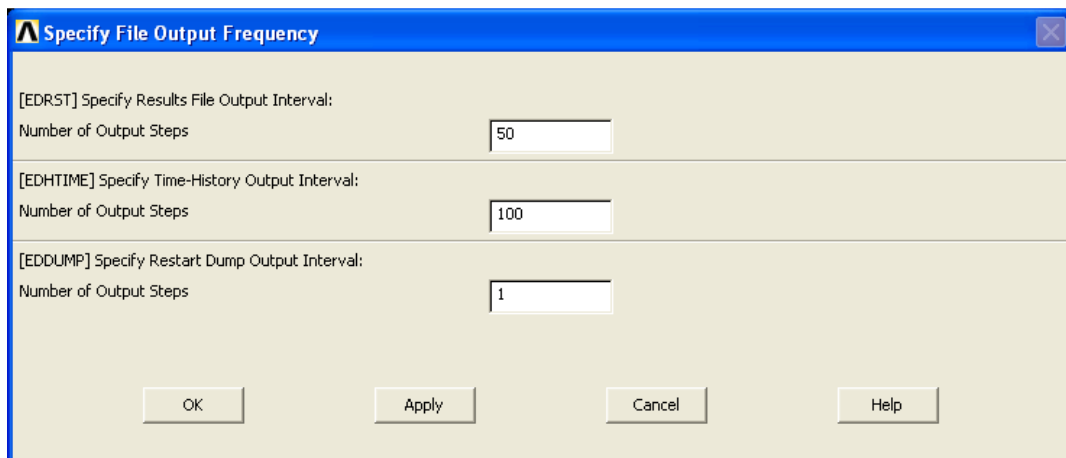


Figura 6.31– Control de salida de datos.

Puede que no todos los elementos del sistema estén activos por lo que se debe hacer este paso para asegurarse.

- **Utility Menu > Select > Everything**

Una vez hechos todos estos pasos, se le da a la opción de SOLVE y empieza a generar archivos de resultados que más tarde se indicará cómo leerlos.

- **ANSYS Main Menu > Solution > Solve**

Antes de terminar, aunque se puede hacer después de que el programa haya calculado la solución, se puede ajustar la escala de desplazamientos para ver las animaciones de los resultados de manera correcta. Una vez abierta la ventana se seleccionará “True Scale”.

- Utility Menu > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling

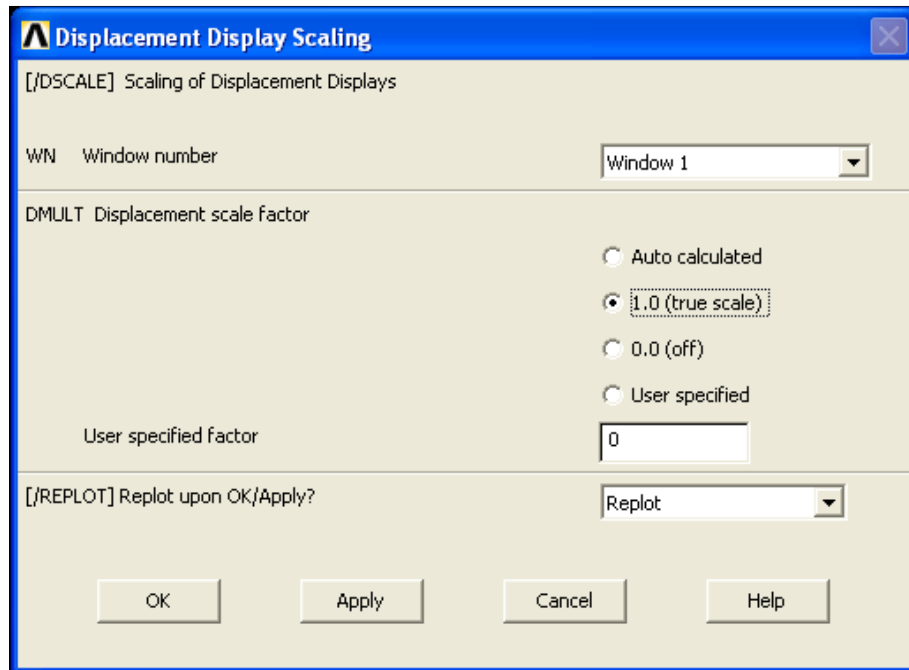


Figura 6.32– Ajuste de escala.

Nota.- Se acaba de explicar todo desde un modo gráfico utilizando la interfaz de LS-DYNA pero si se maneja el código de ANSYS hay veces que es más fácil meter el código para que el programa lo lea. Es bastante útil porque así no hay que ir haciéndolo con el menú y que a veces es complicado. En este proyecto, se ha utilizado en la construcción de los vectores desplazamiento. Primero se diseñaba en un archivo .txt, se copiaba y se pegaba en la barra que se indica en la figura de abajo:

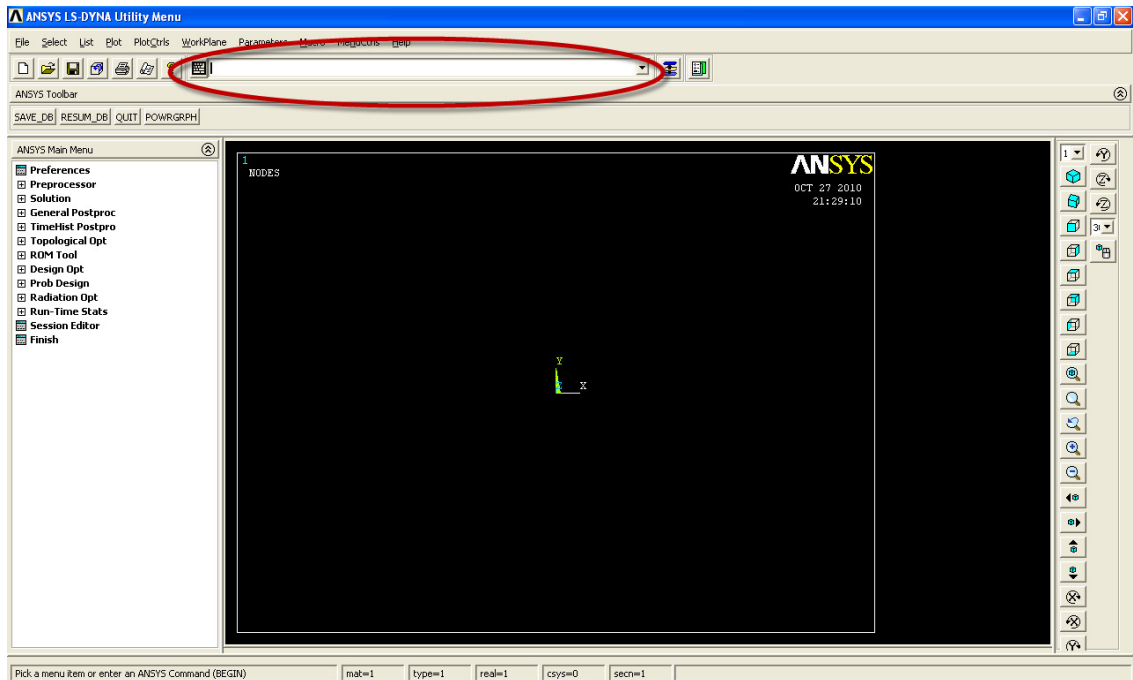


Figura 6.33– Barra para introducir el código directamente.

6.2.2 Resultados Proyecto de Estampación (PASO_0)

La lectura de resultados con el mallado adaptativo es un poco más complicada que sin él ya que como se explicó antes, ANSYS genera un archivo de resultado .RSnn cada vez que hace un mallado nuevo.

En principio, vamos a sacar los resultados para ver cómo se hace el mallado adaptativo y luego se verá según el criterio de Von Misses. Para sacar cualquiera de estos dos, los pasos a seguir primeramente, son los siguientes:

Se elige un archivo de resultados de extensión .RSnn. Da igual cuál se coja porque luego se seleccionará que lean todos.

- **ANSYS Main Menu > General Postproc>Data & File Opts**

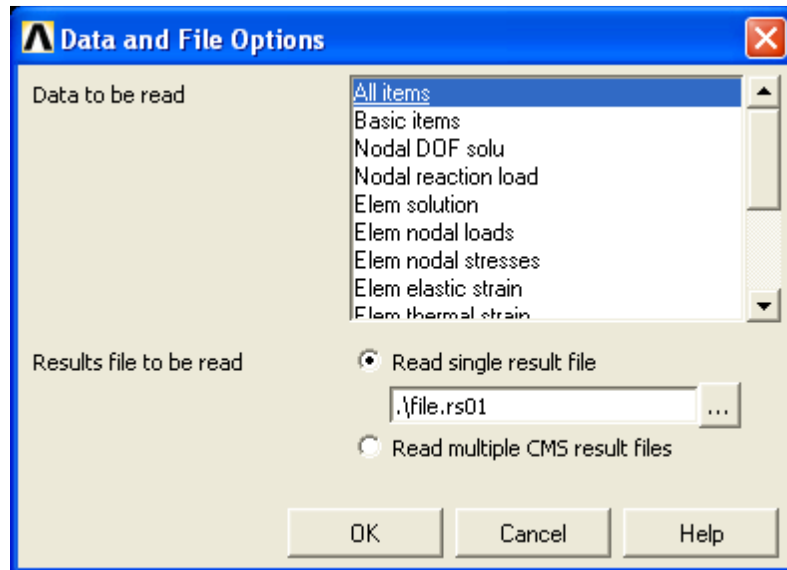


Figura 6.34– Elección de los archivos de resultados para ver la solución.

Nota.- Para buscar los archivo de esta extensión, hay que seleccionar que todo tipo de archivos.

Ahora, hay que ordenarle al programa que lea los archivos de algún modo. El más fácil para nuestro caso sería:

- **ANSYS Main Menu > General Postproc>Read Results > By Pick**

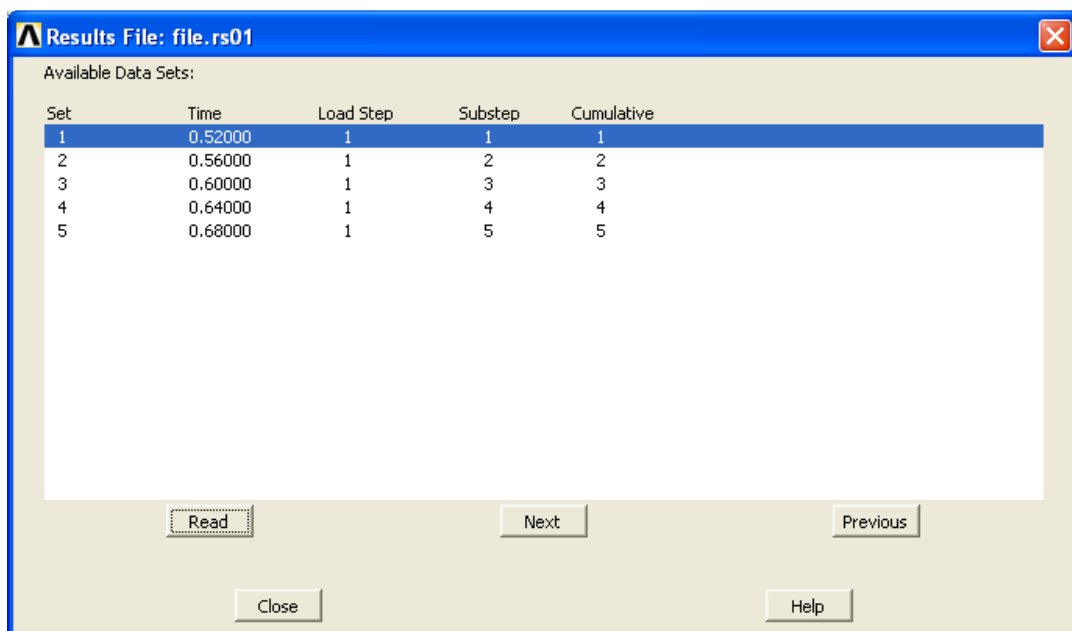


Figura 6.35– Selección para leer los substeps.

Saldrán todas los Substep con su tiempo cada uno. Aquí solo se ven estos pero realmente ANSYS crea muchos más datos con intervalos de tiempos más pequeños.

Para ver la animación de nuestra simulación se deben seguir los siguientes pasos:

- **Utiliy Menu> Animate > Over Results**

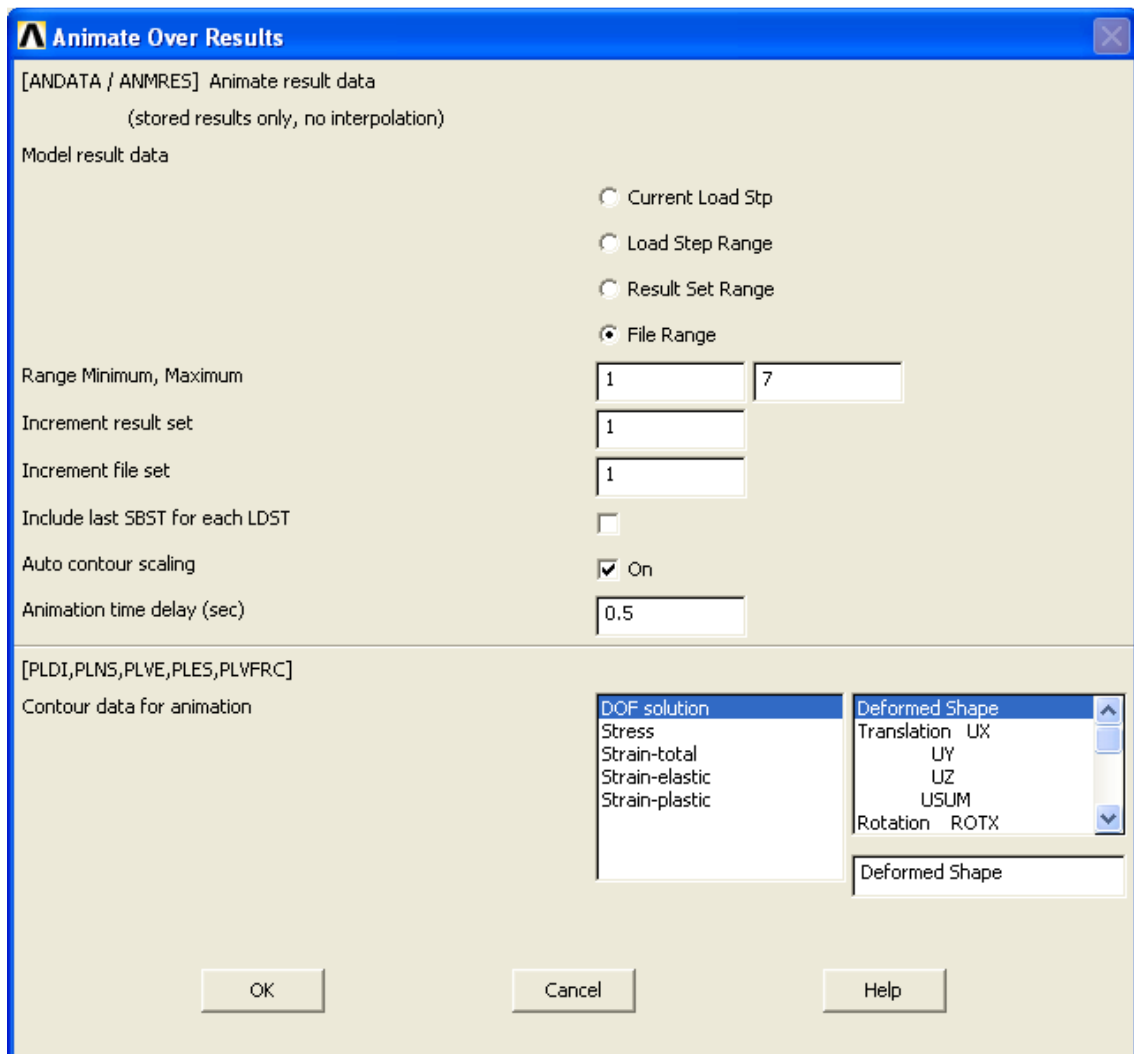


Figura 6.36– Opciones para ver los resultados

Para ver cómo se va produciendo el mallado adaptativo a lo largo del tiempo se debe seleccionar la opción de **'File Range'** y poner el rango de archivos .RSnn que se quieran ver en la animación. En la parte de abajo se seleccionará **'DOF solution'** y **'Deformed Shape'**. A continuación se muestran diferentes etapas del proceso según estos criterios.

Tabla 13– Substeps en el paso 1°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS01	1	0.52000
	2	0.56000
	3	0.60000
	4	0.64000
	5	0.68000

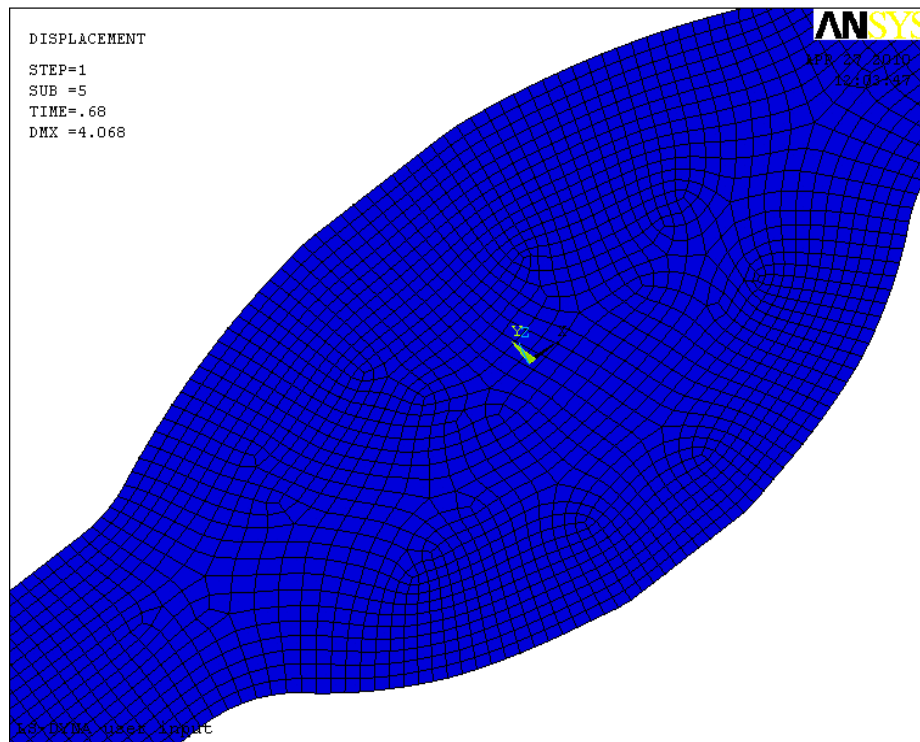


Figura 6.37– Mallado adaptativo en el paso 1°.

Tabla 14– Substeps en el paso 2°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS02	1	0.72000
	2	0.75999
	3	0.80000
	4	0.84000
	5	0.87999

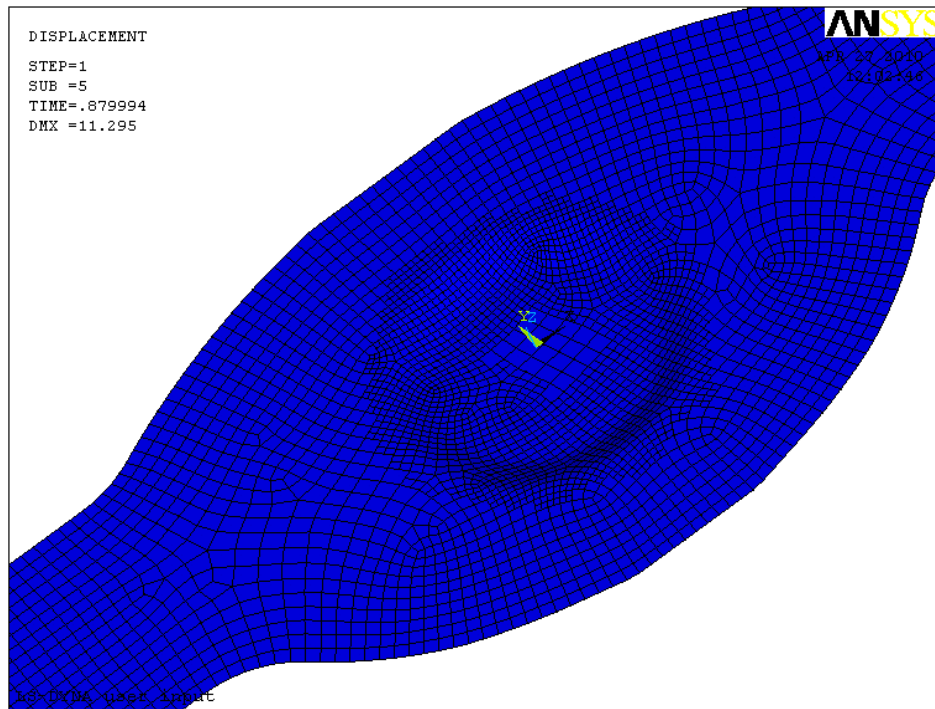


Figura 6.38– Mallado adaptativo en el paso 2°.

Tabla 15– Substeps en el paso 3°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS03	1	0.92000
	2	0.96000
	3	1.00000
	4	1.04000
	5	1.08000

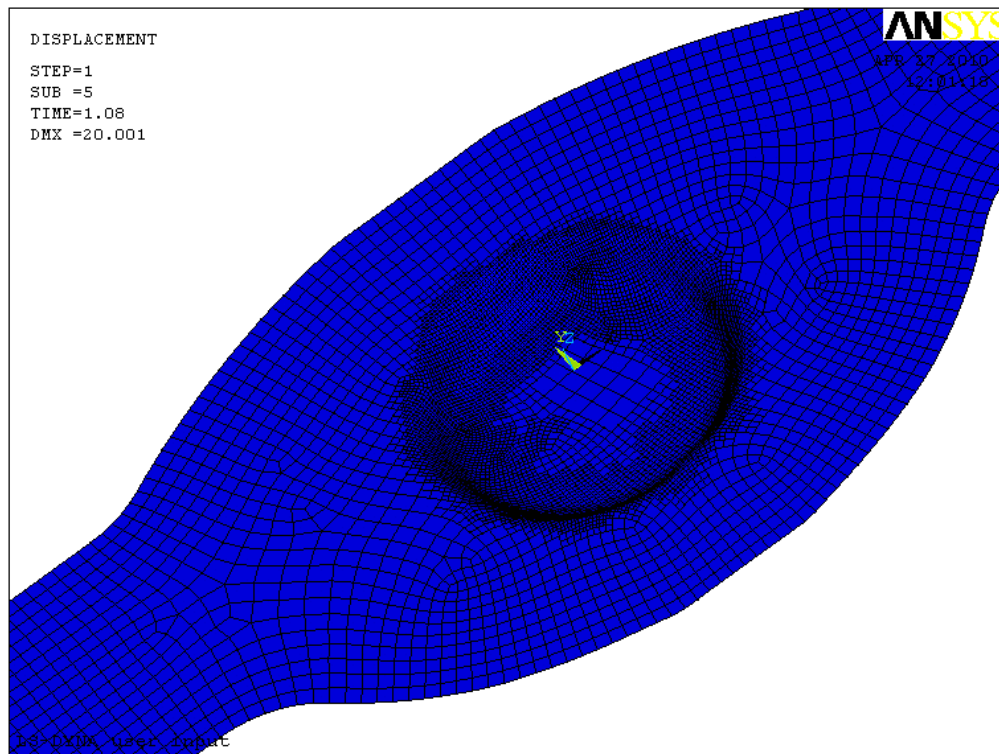


Figura 6.39– Mallado adaptativo en el paso 3°.

Tabla16– Substeps en el paso 4°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS04	1	1.1200
	2	1.1600
	3	1.2000
	4	1.2400
	5	1.2800

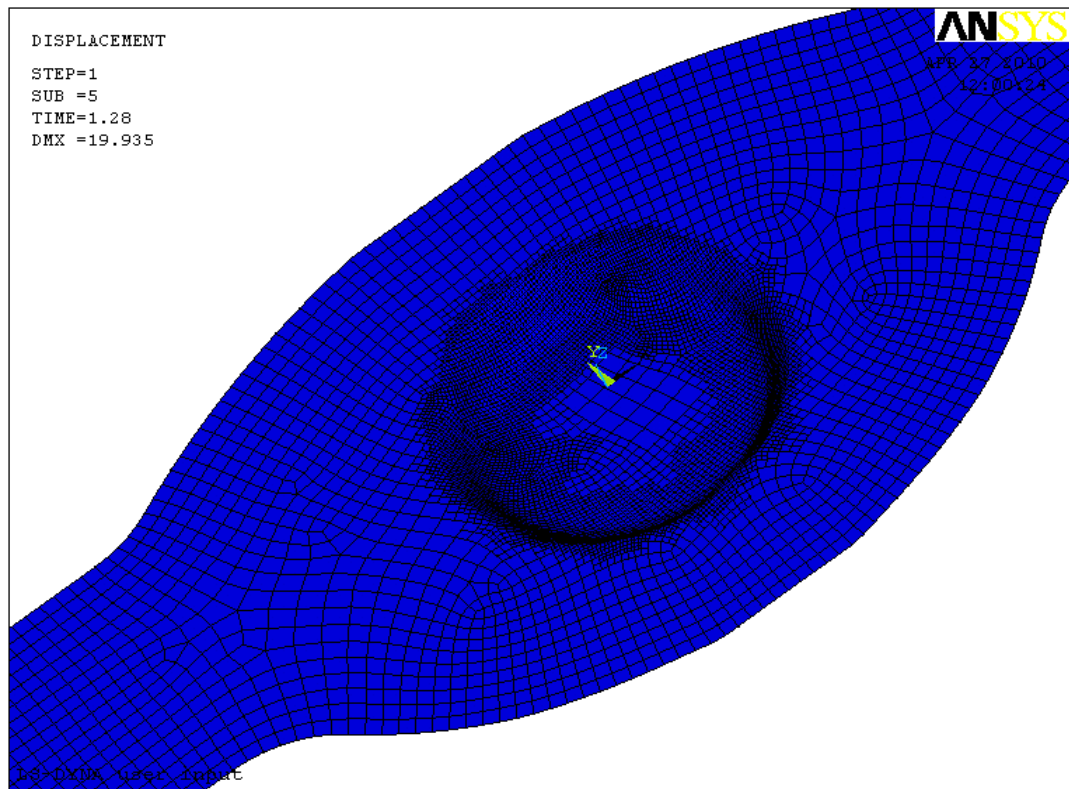


Figura 6.40– Mallado adaptativo en el paso 4°.

Tabla 17– Substeps en el paso 5°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS05	1	1.3200
	2	1.3600
	3	1.4000
	4	1.4400
	5	1.4800

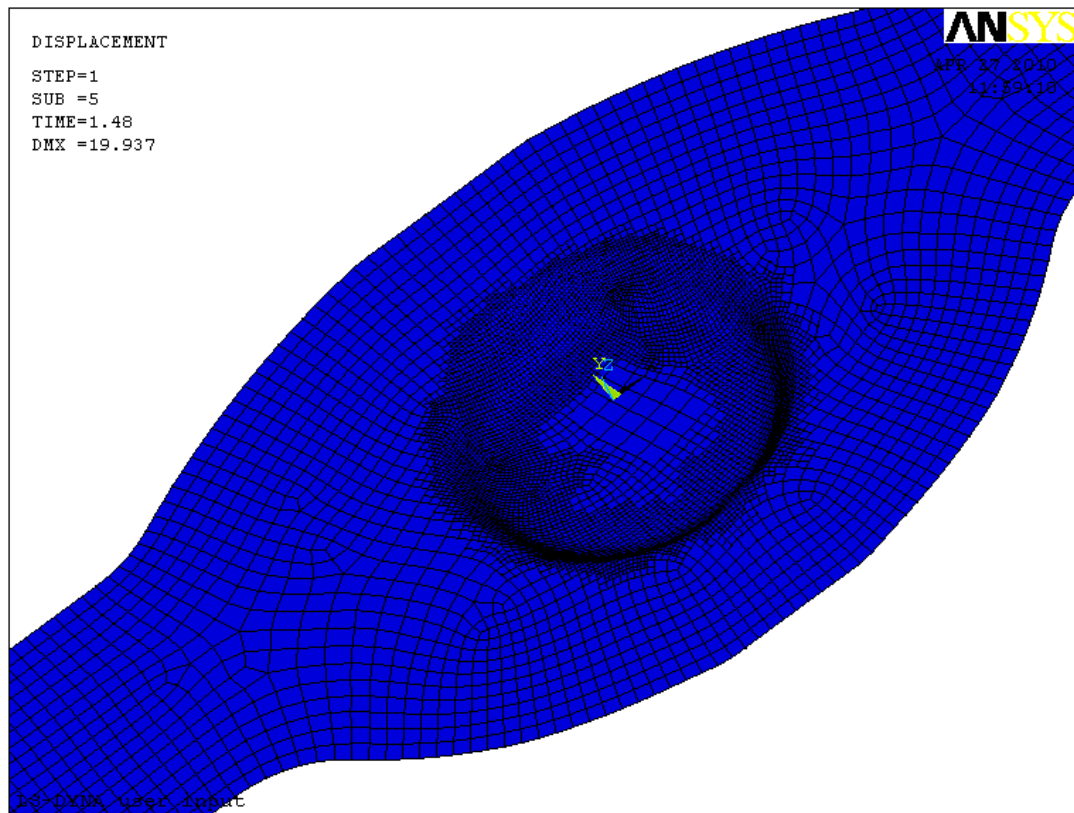


Figura 6.41– Mallado adaptativo en el paso 5°.

Tabla 18– Substeps en el paso 6°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS06	1	1.5200
	2	1.5600
	3	1.6000
	4	1.6400
	5	1.6800

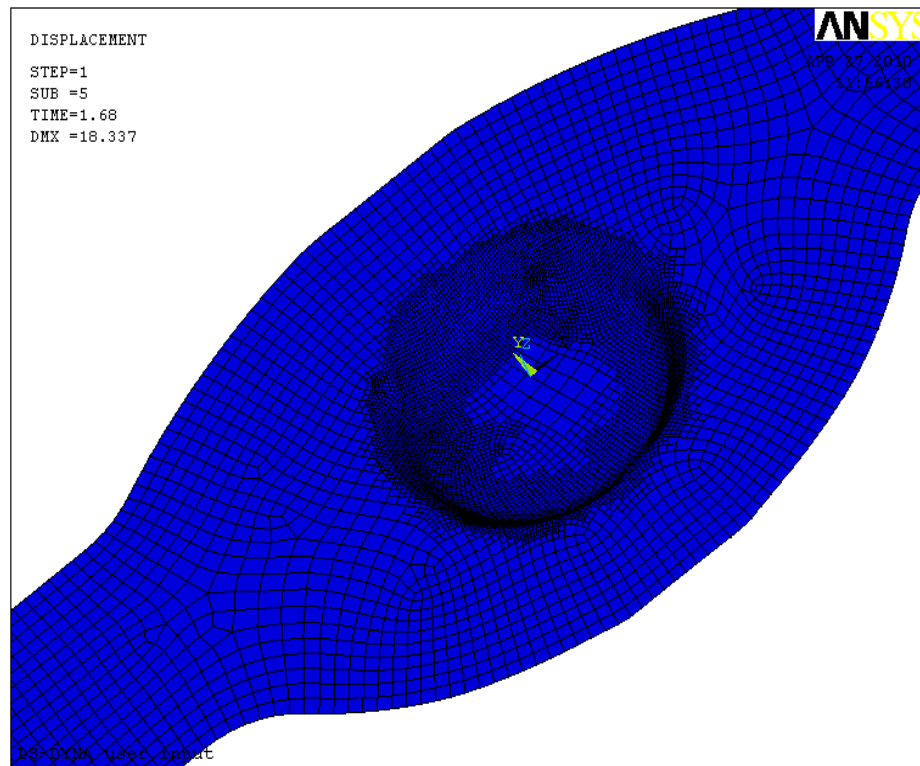


Figura 6.42– Mallado adaptativo en el paso 6°.

Tabla 19– Substeps en el paso 7°.

Archivo	Set	Time
PASO_0.RS07	1	1.7200
	2	1.7600
	3	1.8000
	4	1.8400
	5	1.8800
	6	1.9200
	7	1.9600
	8	2.0000
	9	2.0000

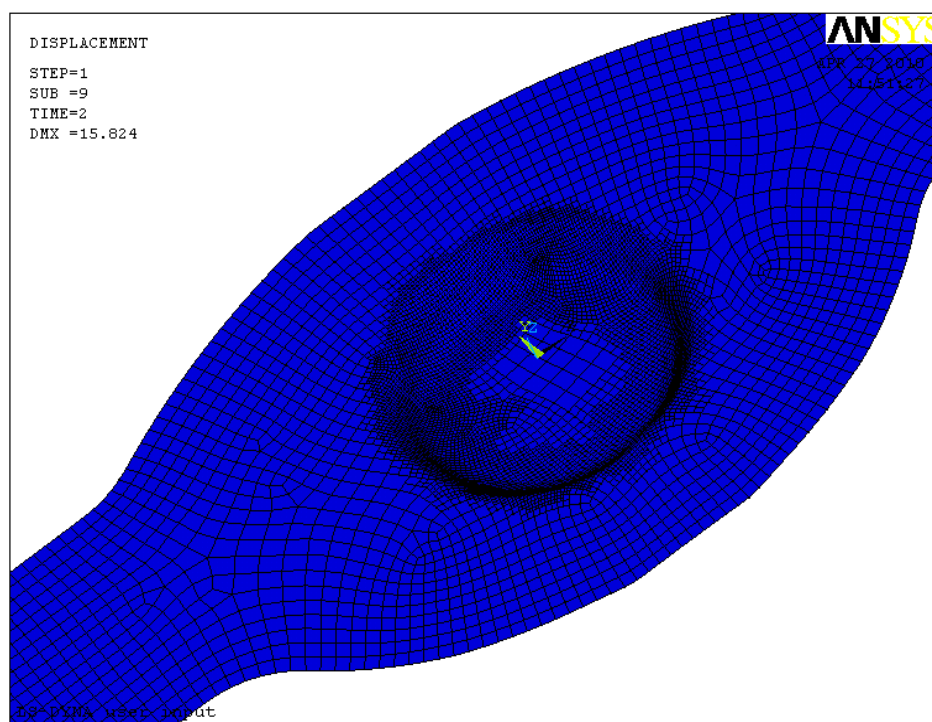


Figura 6.43– Mallado adaptativo en el paso 7°.

Criterio de Von Misses

Para verlo según el criterio de Von Misses, sería prácticamente igual:

- Utiliy Menu> Animate> Over Results

Como se hizo antes, cuando salga la ventana al seguir estos pasos, se pulsa la opción '**File Range**' y después se elige el rango de los archivos de extensión .RSnn que se quiere leer. En la parte de abajo se selecciona '**Stress**' y dentro de ese apartado, '**Von Misses**'.

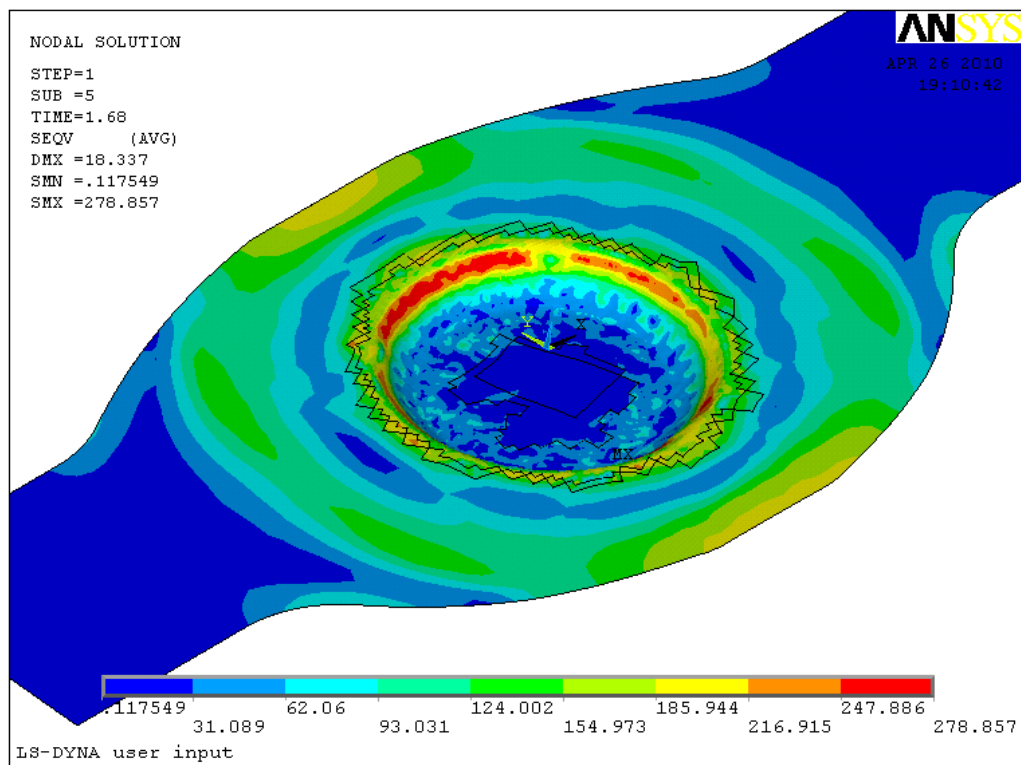


Figura 6.44– Criterio de Von Misses.

6.2.3 Desarrollo del proyecto de estampación (PASO_1)

Lo primero que se debe hacer en este paso es cargar la base de datos del Etapa_0.

- **ANSYS Utility Menu > Open ANSYS File > Etapa_0.db**

Lo siguiente es cargar el archivo de resultados que ha calculado LS-DYNA en la Etapa_0.

- **ANSYS Main Menu > General Postprocessor > Data & File Options > Etapa_0.rst**

Una vez cargado todo del primer paso de la estampación. Se va a hacer el inicio del segundo paso. Se quiere conservar los datos de la placa de la Etapa_0. Para hacer este restart se siguen los siguientes pasos:

- **Main Menu > Solution > Analysis Options > Restart Options > Full Restart**

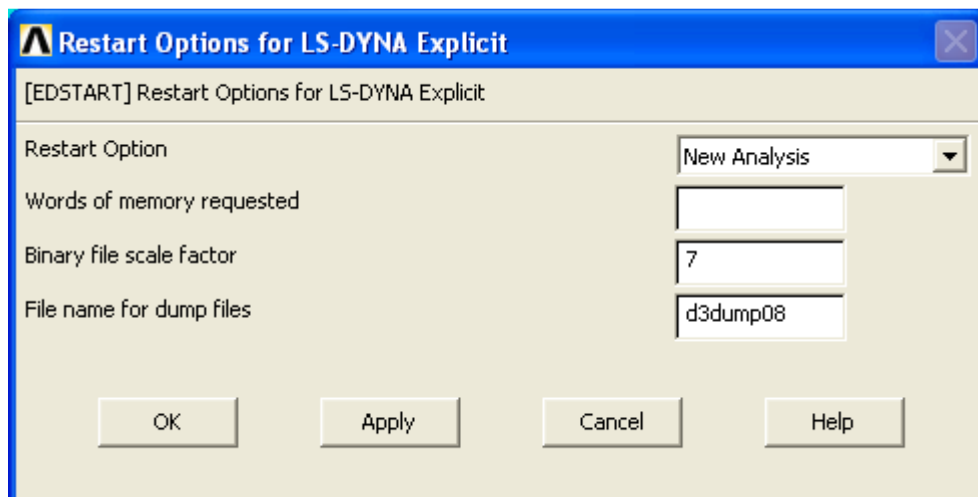


Figura 6.45– Opciones de Restart

Se elige la opción de ‘Full Restart’(Restart del nivel 3), el factor de escala el 7 y en el último apartado, se escribe el último archivo dump que haya escrito LS/DYNA en la Etapa_0. Para nuestra simulación el programa calculó hasta el ‘d3dump13’.

Cuando se ejecuta esta opción, el análisis que antes se llamaba “Etapa_0”, pasa a llamarse “Etapa_1”. También los archivos con la numeración 0 pasan a la 1.

En este paso se pasa al borrado de la geometría del paso anterior que no interesa en éste. Para ello, se borra todo excepto la placa que se conserva para seguir dándole forma.

Primero se borran los mallados de las piezas:

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Clear > Areas**

Y luego las áreas con todos los elementos que contengan éstas:

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Area and Below**

Ya que sólo se tiene la chapa, ahora se deben importar las geometrías de las herramientas y utillajes para la etapa_1. Esto como se ha ido realizando anteriormente, se hace de la siguiente manera:

- **ANSYS Utility Menu > File > Import > IGES > Conjunto_Etapa_1.igs**

Como se han importado nuevas geometrías, se tiene que crear materiales para asignárselos a las geometrías importadas. Primero se crean los materiales nuevos, para no confundirnos con los de la etapa anterior, se definirán a partir del número 7.

- **Material 7:** Punzón (Rigid Material).
- **Material 8:** Pisa_Punzón (Rigid Material).
- **Material 9:** Pisa_Extra (Rigid Material).
- **Material 10:** Matriz (Rigid Material).
- **Material 11:** Pisa_Matriz (Rigid Material).

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models > New Model > LS-DYNA > Rigid Material**

Para evitar problemas, se borran los materiales 2, 3, 4, 5 y 6 del paso anterior. Se utiliza la misma ventana que se acaba de utilizar para la definición.

En este paso, se mallan las áreas de las geometrías que tenemos. Esto también sirve para asignar los materiales que se han creado antes, a cada área. Se va a dejar que el programa escoja el tamaño de mallado más adecuado

Tabla 20–Resumen de los materiales del paso_1.

	Nº de material	Real constants	Áreas
Punzón	4	1	51-59
Pisa_Punzón	3	1	35-39
Pisa_Extra	1	1	33
Matriz	2	1	31-32;40-50
Pisa_Matriz	5	1	34

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh Tool**

Como en la etapa_0, las partes no se crearon individualmente con el comando ‘Add’ sino que se crearon con el comando ‘Update’. Ahora, no se pueden borrar las partes directamente, pero como se han borrado los mallados y todos los elementos de las áreas del paso anterior, el programa sólo reconoce lo que se acaba de mallar. Por tanto, simplemente creando todas las partes nuevas, se crean las partes deseadas que van del 1 al 6. El orden de éstas se creará aleatoriamente pero se desea tener un orden específico porque una de las restricciones del Full Restart era que no se pueden variar los contactos. Para ello, en el paso anterior que era el de mallar, se tiene que mallar en el orden que se quiere que LS-DYNA cree las partes.

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Part Options > Create all Parts**

Lo que se va a hacer ahora es uno de los pasos que difiere completamente de los hechos en la etapa_0. Se inicializa el estado tensional de la etapa_0 de la placa con la que se lleva trabajando en el paso anterior y en éste. Se utiliza la opción ‘Add’ porque lo que se quiere es conservar el estado tensional de la placa de la etapa_0 en la etapa en la que se está trabajando ahora y que es la etapa_1

- **ANSYS Main Menu > Solution > Analysis Options > Initial Stress > Add [Part1]**

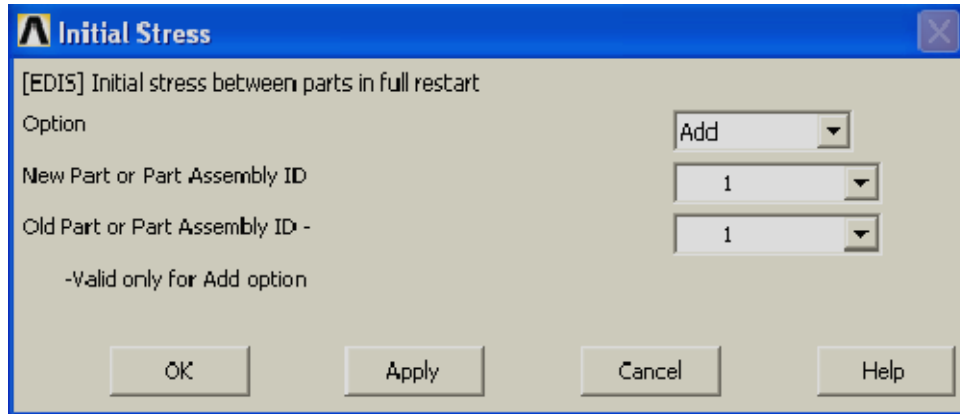


Figura 6.46– Selección de part para que tenga las tensiones del paso anterior.

Como se puede observar en la figura, en la opción de ‘New part’ y en la de ‘Old Part’ se elige la 1 porque la parte que desea que se conserve es la placa y ésta está siendo la parte 1 durante todo el proceso.

Para definir las nuevas cargas, es necesario borrar las cargas anteriores. Se borrarán todas las cargas y luego los vectores de esas cargas.

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Delete Loads > Delete All**

Ahora los vectores de esas cargas porque se crearán otros completamente nuevos en el siguiente paso.

- **ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Define/Edit → Delete**

Se definen las cargas y esto se hace primero definiendo los vectores de esas cargas.

- **ANSYS Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Edit**

Y luego aplicando las cargas. Estas acciones se hicieron en la etapa_0 y es bastante simple por lo que no hace falta explicarlo con más detenimiento.

Tabla 21–Resumen las parts y los tipos de carga.

Componente	Número de parte	Tipo de carga
Matriz	4	RBUZ
Pisa_Matriz	6	RBFZ
Pisa_Punzón	3	RBFZ

- **ANSYS Main Menu > Preprocessor > LS-DYNA Options > Loading Options > Specify Loads > Add Loads**

Sólo queda especificar el tiempo final de la simulación porque el número de archivos de salida seguirán de la misma forma en que la se hizo en la etapa_0. Esta simulación está definida para que termine en un tiempo de 3,47. Por tanto, la etapa_1 transcurrirá entre el tiempo de 2 a 3,47 segundos.

- **ANSYS Main Menu > Solution > Time Controls > Solution Time**

Para terminar, se le da a resolver nuestra simulación para que calcule y luego poder ver todos los resultados.

- **ANSYS Main Menu > Solution > Solve**

6.2.4 Resultados del Proyecto de Estampación (PASO_1)

A continuación en lugar de poner los resultados, se ha visto la obligación de exponer los problemas que se han tenido ante la imposibilidad de obtener resultados. Se exponen a continuación:

1.- Cuando se le dio a Solve para resolver la simulación, el programa comenzó a resolver pero justo antes de escribir el primer resultado, el programa escribió un error que decía que el mallado adaptativo no se podía realizar porque el tiempo de finalización de mallado adaptativo era inferior al tiempo de simulación. Si recordamos los parámetros de éste, el tiempo de finalización era 2 segundos. A pesar de esto, se dejó que siguiera calculando para ver si realizaba cálculos sin mallado adaptativo a partir de los 2 segundos. Cuando terminó y se quiso ver las animaciones de los resultados, el programa dio error indicando que los archivos no contenían resultados. Era muy raro porque se podían ver en la carpeta de archivos, los archivos de resultados y en el mensaje de errores, no había escrito ningún error que impidiese el cálculo.

2.- Antes de ordenarle al programa que resolviera (comando 'Solve'), se intentó modificar los parámetros del mallado adaptativo para ampliar el tiempo de finalización pero salió un error indicando que después de haber hecho un 'Full Restart' no se podían modificar estos parámetros. Entonces, lo que se hizo, es volver a calcular todo desde el principio. Es decir, desde el paso_0. Se volvió a calcular el paso_0 pero con los parámetros de mallado adaptativo cambiados, ya que se puso el tiempo de finalización igual que el tiempo total de la simulación del 'Full Restart'. En nuestro caso, de 4.3 segundos. Con esto cambiado, se hizo después del 'Full Restart' y cuando el programa empezó a escribir resultados, ya no escribía el error del tiempo de finalización del mallado adaptativo. Después de que el programa resolviera toda la simulación, se intentó visualizar los resultados pero otra vez nos salía que no era posible porque los archivos no contenían resultados.

3.- Después de repetir los arreglos expuestos anteriormente pero con otros parámetros de mallado, se revisó a fondo el archivo de comandos y no se vio ningún problema como para que ANSYS nos diera ese error. También se analizó el archivo de errores que genera el programa y tampoco daba ningún error sustancial. Por último, se acudió al archivo donde ANSYS escribe todos los pasos que va realizando para escribir los resultados. Este archivo muestra los incrementos de tiempo; cuando genera archivos 'dump'; cada vez que remalla, indicando el número de elementos que tenía la malla antes y después del mallado; y varias cosas más. Aquí se pudo ver algo raro, se observó que después del 'Full Restart', cuando hacía el remallado, escribía resultados pero partiendo desde un tiempo que ya había calculado anteriormente. Por ejemplo 1.92 segundos y que este tiempo era del paso_0. También se sospechó que no estaba correcto porque el paso_1, ANSYS terminaba de calcularlo en una hora aproximadamente, mientras que el paso_0 lo hizo en 6 horas.

Ya que se observaron estos errores que en principio eran importantes, se acudió a ANSYS/LS-DYNA User's Guide para ver si se podía utilizar el mallado adaptativo,

habiendo usado el comando 'Full Restart'. Efectivamente, se pudo leer en ANSYS/LS-DYNA User's Guide, 2004, página 121 [4] lo siguiente:

Adaptive meshing: Adaptive meshing (**EDADAPT** and **EDCADAPT**) is not supported in a full restart. In addition, a full restart is not possible if adaptive meshing was used in the previous analysis.

Un vez que se había quedado claro de dónde venía el error, se optó por hacer el paso_0 y el paso_1 en una **misma simulación**. Así se conseguiría realizar el mallado adaptativo a lo largo de toda la simulación ya que no se utilizaría el comando 'Full Restart'. A nivel de visualización sería un poco menos gráfico pero a niveles de resultados sería igual que si lo hubiésemos hecho de la forma que se intentó al principio.

6.2.5 Simulación del PASO_0 y PASO_1 juntos

Una vez llegado a estas alturas de proyecto, se cree que los procesos de construcción del modelo y los pasos siguientes han quedado bastantes claros. Por tanto, lo que se va a hacer aquí, es mostrar las propiedades de los elementos que componen la simulación y explicar algunas excepciones.

Tabla 22–Resumen de partes para el paso_0 y paso_0 juntos.

Elemento	Áreas	Número de Material	Número de Paso	Número de Parts
Placa	1	1	Paso_0	1
Matriz	89-102	2	Paso_0	2
Pisa	88	3	Paso_0	3
Punzón	103-136	4	Paso_1	4
Área 1	87	5	Paso_1	5
Área 2	86	6	Paso_1	6
Punzón	51-59	7	Paso_1	7
Pisa Punzón	31-39	8	Paso_1	8
Pisa Extra	33	9	Paso_1	9
Matriz	31-32,40-50	10	Paso_1	10
Pisa Matriz	34	11	Paso_1	11

Aunque no se explique cómo se ha hecho el código para esta simulación, sí se ve necesario comentar algunas partes de los *vectores desplazamiento y fuerza*. Se han hecho unos ajustes que no se parecen mucho a lo que se ha hecho hasta ahora. El código íntegro de esta última y definitiva simulación es el anexo 1 aunque se van a poner algunos comandos para facilitar la explicación.

- Como se ha dicho, se han tenido que hacer las dos etapas en la misma simulación por lo que había herramientas y utillajes que podían molestar a la hora de trabajar en cada etapa. Por lo tanto, lo que se ha hecho es mandar las herramientas y utillajes que no trabajan en su etapa correspondiente, a una distancia suficiente para que no molesten. Para que las del paso_1 no influyeran en el paso_0, lo que se ha hecho es separar las geometría (sin mallar) a la distancia necesaria de la que se hablado antes (50mm).

```

/REP7
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,33
AGEN, ,P51X, , , ,50, , ,1
FLST,3,9,5,ORDE,2
FITEM,3,51

```

```

FITEM,3,-59
AGEN, ,P51X, , , ,50, , ,1
FLST,3,13,5,ORDE,4
FITEM,3,31
FITEM,3,-32
FITEM,3,40
FITEM,3,-50
AGEN, ,P51X, , , , -50, , ,1
FLST,3,1,5,ORDE,1
FITEM,3,34
AGEN, ,P51X, , , , -50, , ,1
FLST,3,5,5,ORDE,2
FITEM,3,35
FITEM,3,-39
AGEN, ,P51X, , , ,50, , ,1
!*

```

- Una vez que se realizaba el paso_0, las herramientas y utillajes del paso_0 se tienen que separar y las del paso_1 acercar y colocarse en su posición original. Todo esto se ha hecho con los vectores desplazamientos ya que las geometrías estaban malladas. Se puede ver en los vectores desplazamiento en el anexo 1.
- También hay otro aspecto que difiere de otros proyectos [1], es que al tener las piezas lejos y tener que controlar los movimientos desde el primer instante de tiempo hasta el último con los vectores de movimientos, nos impedía aplicar fuerzas de un valor determinado. Esto nos pasaba con el PISA_PUNZON y con el PISA_MATRIZ. Para solucionar este problema, lo que se ha hecho es aplicar vectores desplazamiento hasta el final del paso_0 y así al comenzar el paso_1, aplicar vectores fuerza. De esta manera, los utillajes se quedaban en la posición deseada al comienzo del paso_1 y a partir de ahí ejerce sólo fuerza.
- Otra forma de hacer lo que se ha hecho sobre los vectores de desplazamiento es que cuando se definen los contactos, poner tiempo inicial y final de contacto. De esa forma, los contactos se pueden programar en función del tiempo y así influir sobre la solución en el momento que nos interesa.

Después de cargar el código entero y habiendo definido los ajustes explicados anteriormente, el sistema completo montado se podría ver de la siguiente manera. Se hará una vista con las parts para facilitar la comprensión.

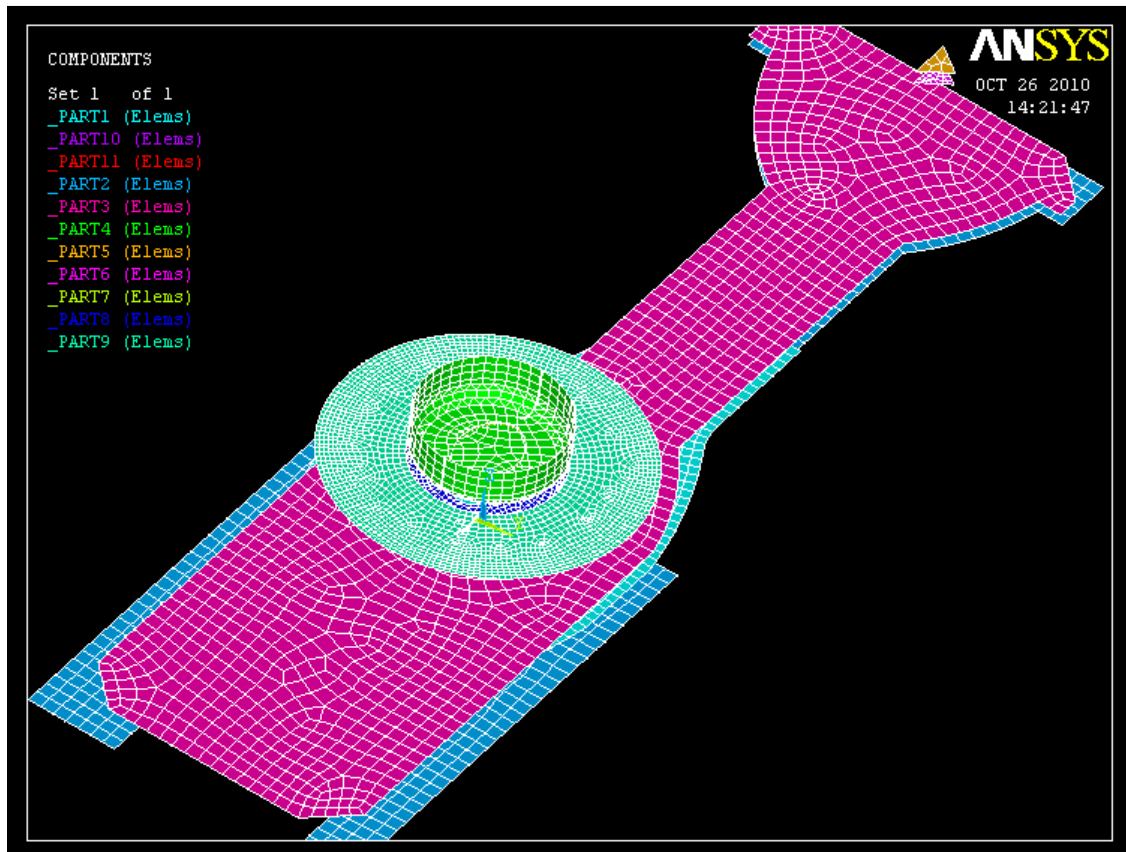


Figura 6.47– Conjunto representado por parts.

Se puede ver como algunas herramientas tienen un mallado más fino que otros. Se ha realizado esto para las que tenían alguna parte curva. Se ha decidido hacer esto para que nos dé resultados más precisos y además no influye casi nada sobre el tiempo de cálculo. No influye en este cálculo porque al ser elementos rígidos, no se deforman y por tanto no dan muchos más resultados. Si se hubiese mallado más fino la chapa, el tiempo sí hubiese aumentado notablemente ya que hubiesen habido deformaciones y tensiones.

Una vez expuesto el proceso completo de estampación se va a proceder a explicar la parte de resultados.

6.2.6 Resultados gráficos del PASO_0 y PASO_1 juntos

Para la parte de resultados, como bien se sabe, hay muchas formas de ver las soluciones. Pues bien, debido a que las soluciones en $0 < t < 2$ son prácticamente iguales a las que se expusieron en la parte de resultados del paso_0, ahora se va a hacer a partir de $t = 2$. Las soluciones serán gráficas y numéricas y en $2 < t < 3,47$.

$2 < t < 2,29$

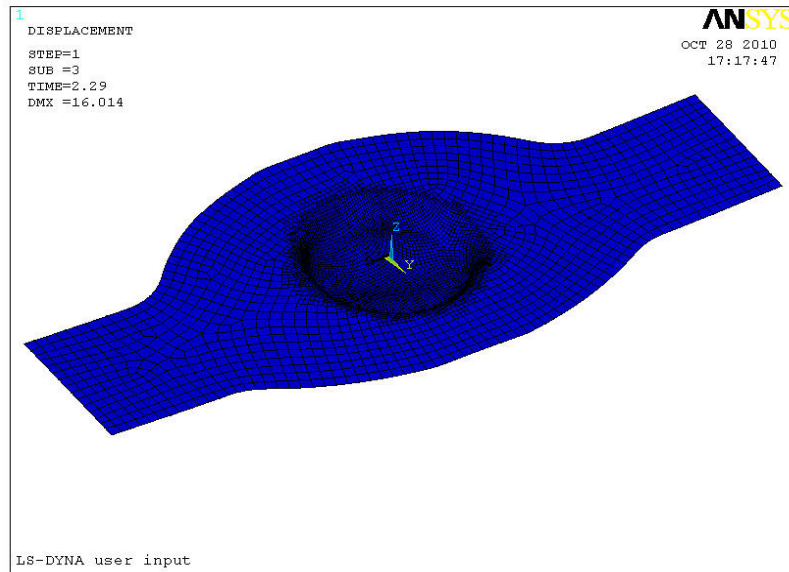


Figura 6.48– Mallado en el 1º paso.

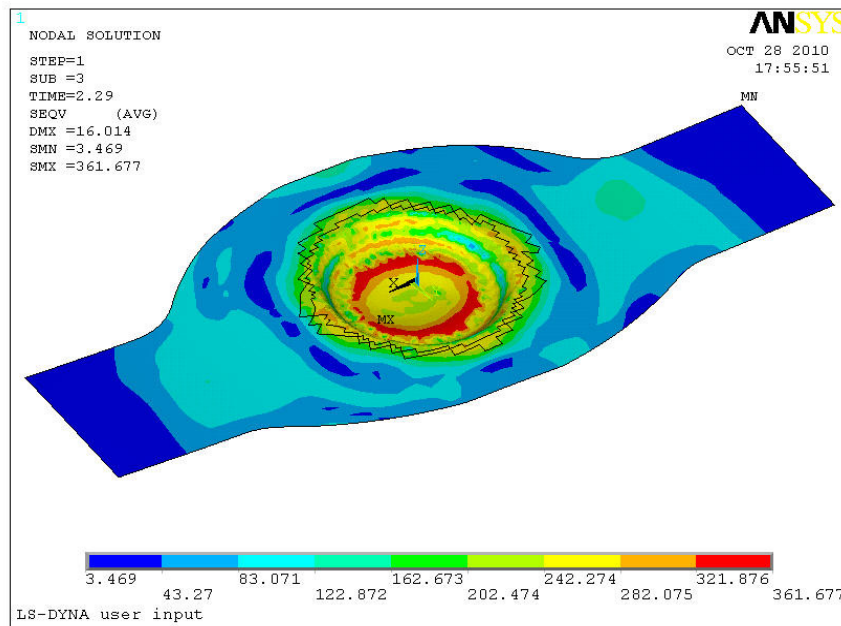


Figura 6.49– Von Misses en el paso 1º.

$2,29 < t < 2,498$

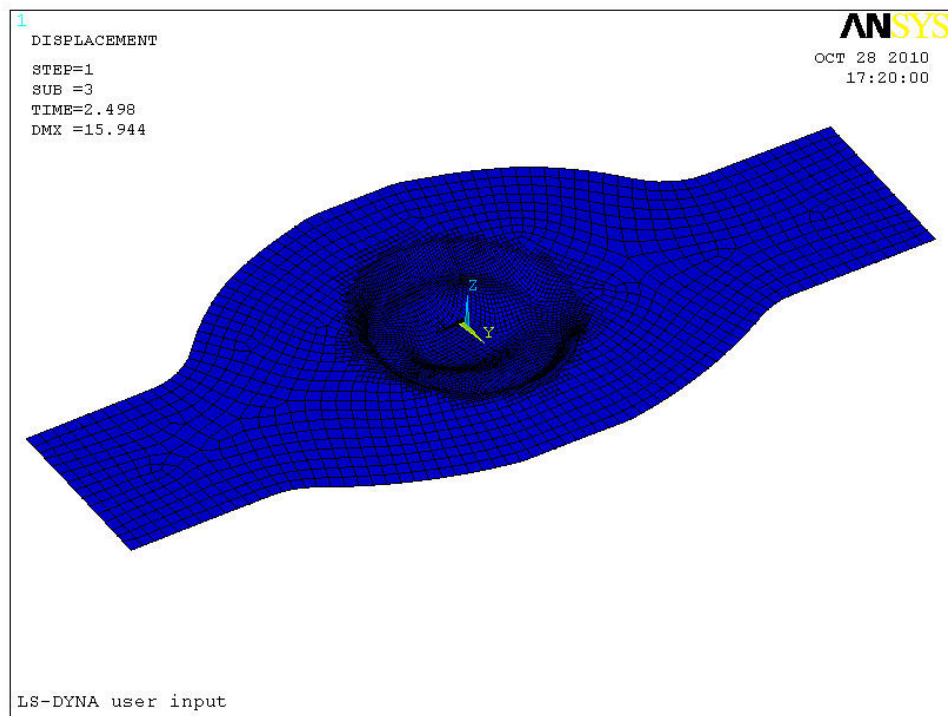


Figura 6.50– Mallado en el 2º paso.

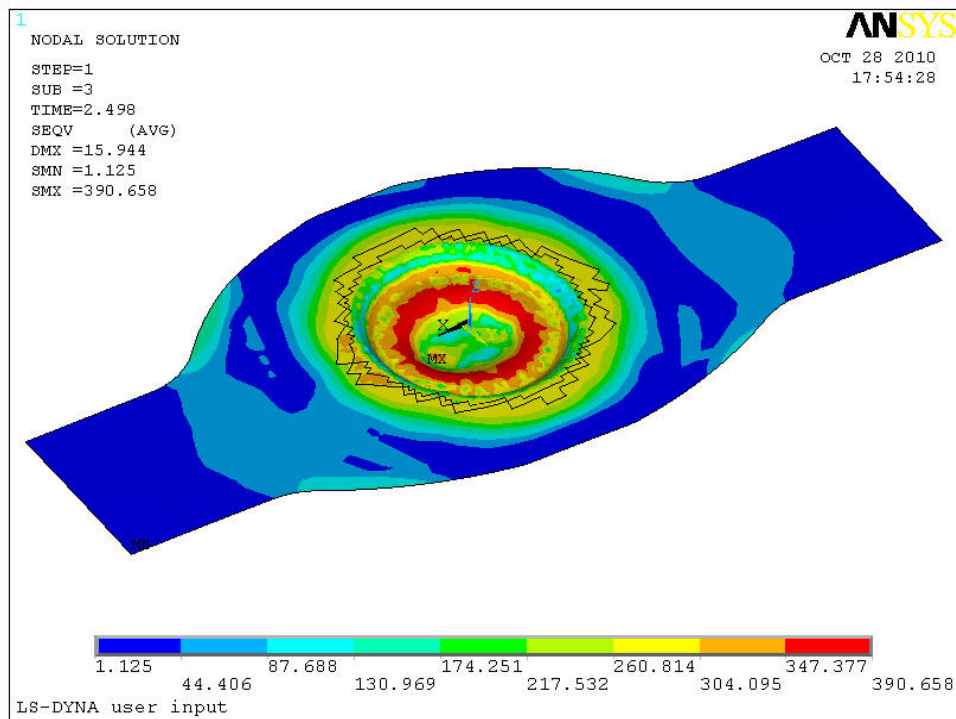


Figura 6.51– Mallado en el 2º paso.

$2,498 < t < 2,637$

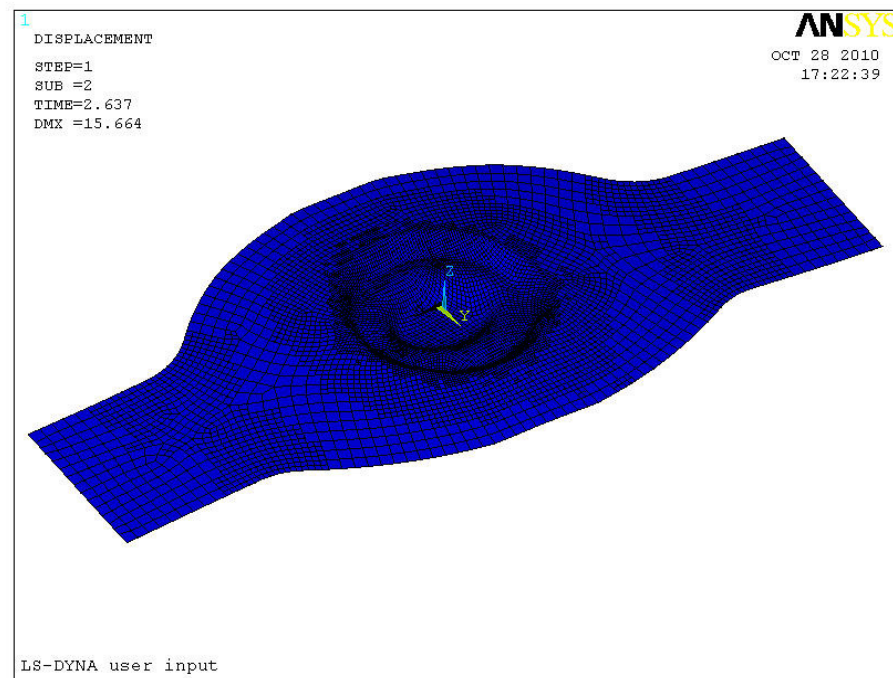


Figura 6.52– Mallado en el 3° paso.

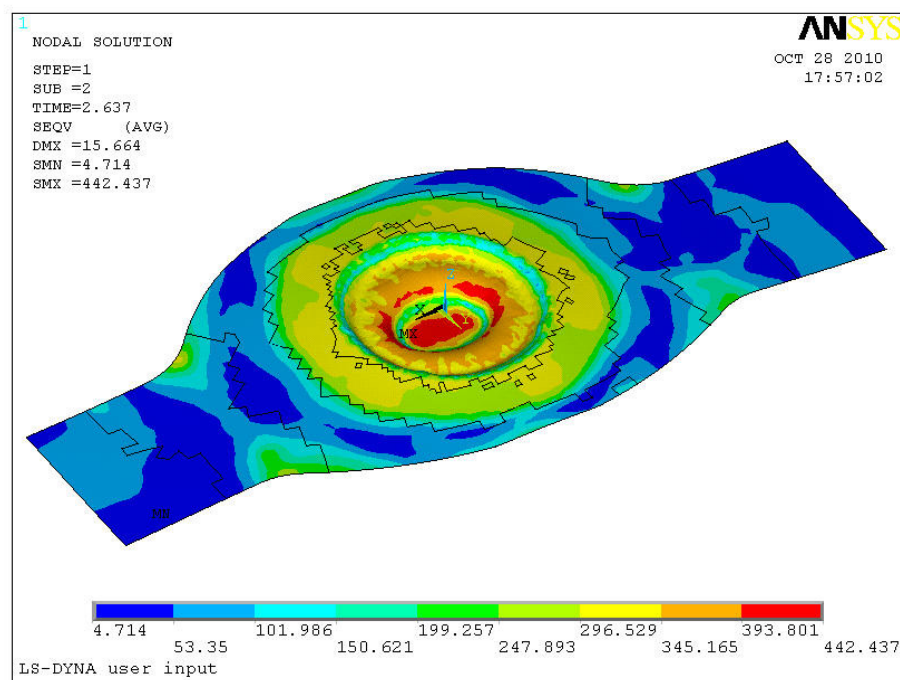


Figura 6.53– Mallado en el 3° paso.

$2,637 < t < 2,845$

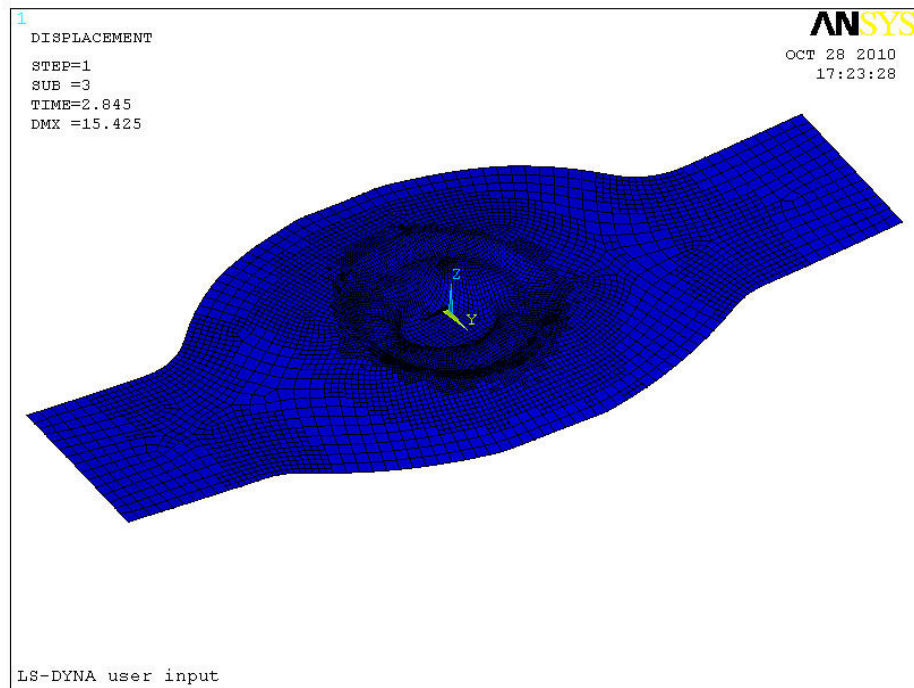


Figura 6.54– Mallado en el 4º paso.

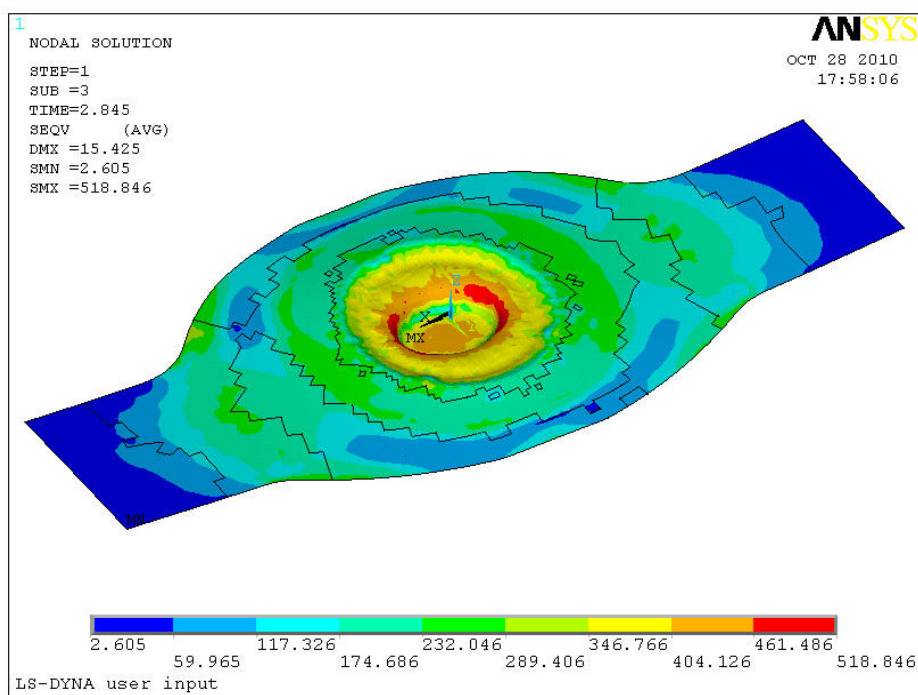


Figura 6.55– Mallado en el 4º paso.

$2,845 < t < 3,47$

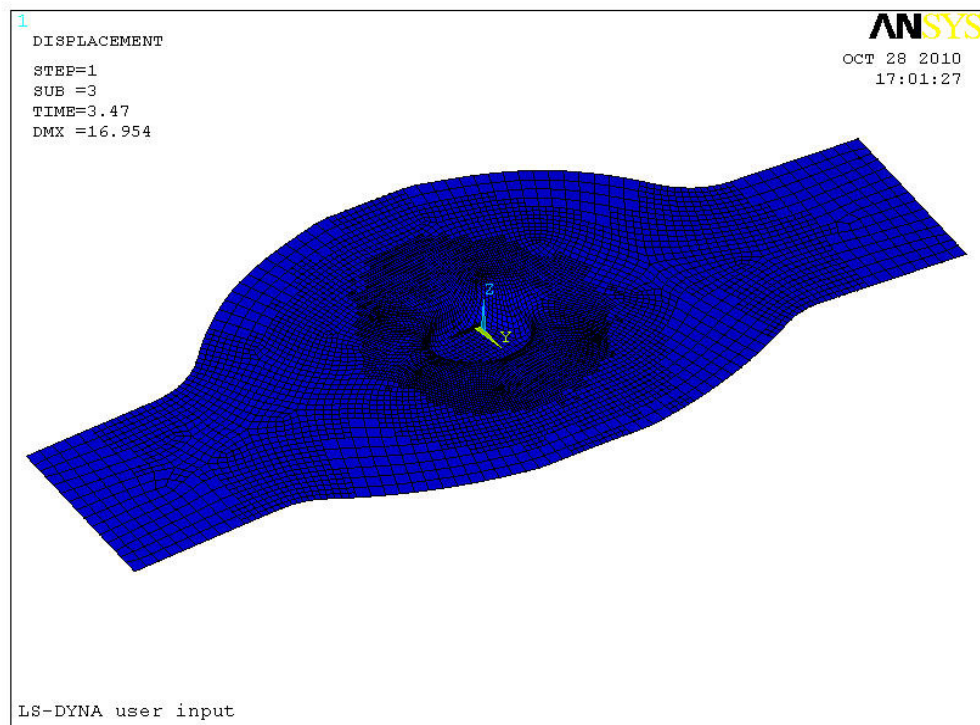


Figura 6.56– Mallado en el 5° paso.

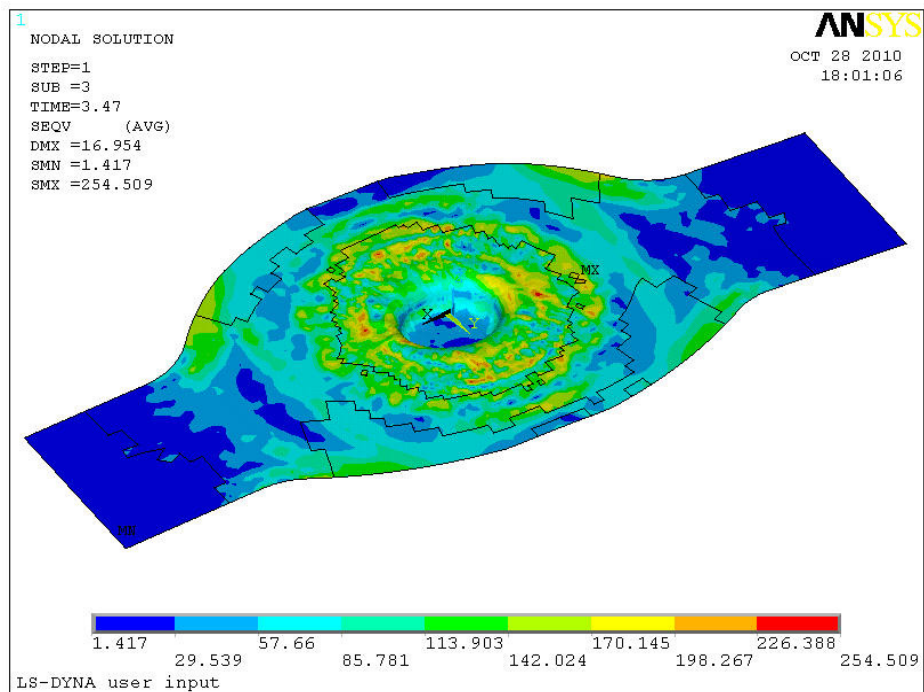


Figura 6.57– Mallado en el 5° paso.

Forma final de la chapa vista de perfil

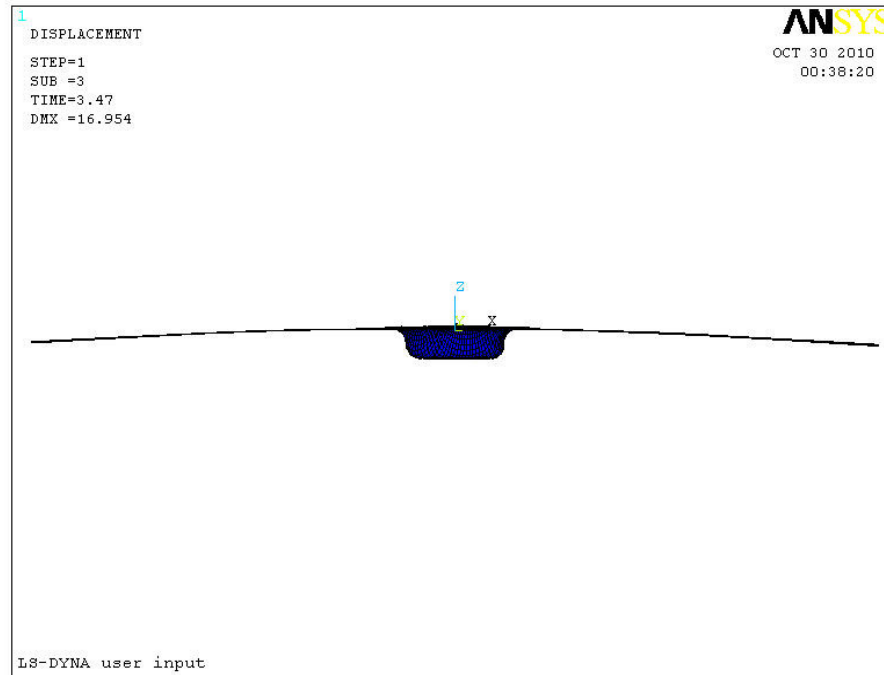


Figura 6.58– Forma final vista de perfil.

6.2.7 Resultados numéricos del PASO_0 y PASO_1 juntos

Una vez mostrado gráficamente algunos de los resultados tales como la deformada y las tensiones con el criterio de Von Mises. A continuación se va a pasar a ver los resultados de desplazamientos. Se podrá comprobar con la solución nodal mirando los desplazamientos de los nodos de forma numérica y de forma aproximada con los datos que se nos dan en los gráficos de LS-DYNA. Se corroborarán los datos que nos da la simulación con los que se sacan del palpado físico de la pieza real.

A modo orientativo también se pone aquí el gráfico que nos da LS-DYNA y donde se puede ver la pieza dividida en varias partes en función de los desplazamientos dentro de la pieza. Se puede ver cómo toda la pieza sufre algunos desplazamientos ya que para el ensayo no se consideraron la totalidad de los troqueles de las herramientas. Por tanto, la pieza se alabea por algunas zonas.

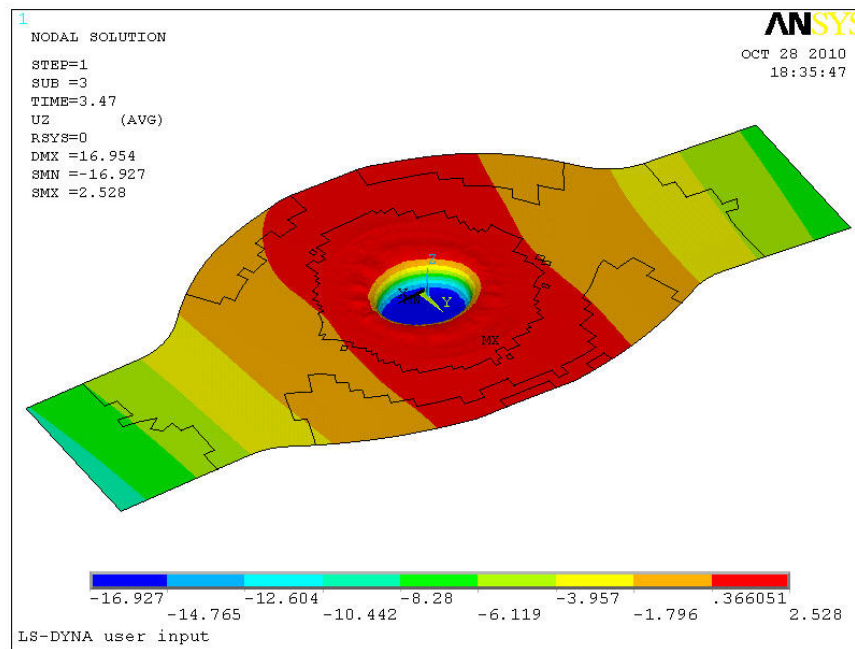


Figura 6.59– Pieza dividida en función de desplazamiento de sus nodos.

Los primeros datos mostrados son la posición de los nodos después de la estampación. Estos datos se sacan de los resultados que nos ha dado la simulación. La zona estampada se divide en dos tramos para facilitar la comprensión tal y como se indica en la figura de abajo.

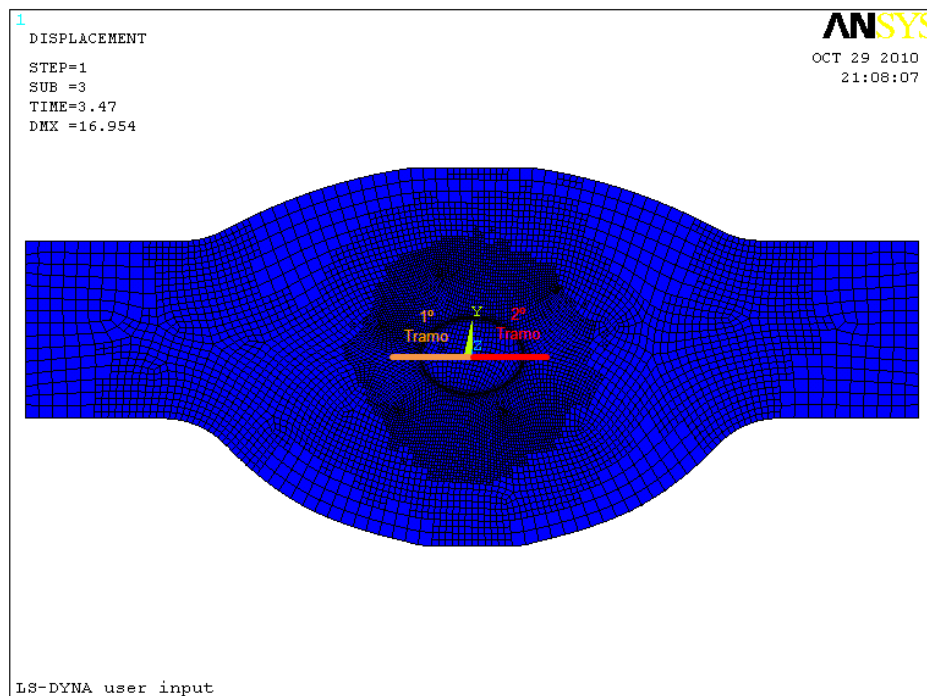


Figura 6.60– Placa dividida en tramos la parte de mayor densidad de mallado.

A continuación, se expondrán las coordenadas de algunos puntos de la chapa en función del eje longitudinal y dando su desplazamiento en el eje Z (profundidad). Estos datos se utilizarán para comparar cómo ha quedado la placa después de la simulación y cómo queda después del proceso real realizado en la prensa. Los datos de la placa real han sido tomados por la medición física de la pieza en la máquina.

Tabla 23–Posición de los nodos para la placa simulada con mallado adaptativo

Placa Simulada					
Tramo $-66 < X < 0$			Tramo $0 < X < 66$		
Nodo	Coordenada en x (mm)	Desplazamiento en z (mm)	Nodo	Coordenada en x (mm)	Desplazamiento en z (mm)
13080	-62,9	0,682	11050	0,078	-16,927
13079	-61,74	0,617	15512	2,32	-16,812
13075	-57,7	0,755	11048	4,57	-16,804
11231	-54,42	0,853	15148	6,82	-16,75
12711	-52,27	0,911	15117	11,45	-16,737
12712	-50,78	0,955	15109	14,73	-16,71
12714	-48,43	1,205	14981	19,787	-16,71
12715	-46,06	1,4538	14979	23,96	-15,385
12290	-43,7	1,191	12251	27,68	-11,558
12273	-40,06	0,875	12236	33,762	-3,5594
12272	-38,33	0,263	12230	36,1	-1,2789
12274	-36,06	-1,477	11040	38,119	0,50438
12275	-33,8	-3,4661	12228	40,58	1,11388
11063	-30,74	-7,362	12231	42,82	1,993
14991	-28,59	-10,242	12393	47,5606	1,57
15186	-23,14	-15,266	12232	45,47	1,471
15176	-20,87	-16,408	12394	50,02	0,8914
15161	-13,824	-16,62	12418	52,87	0,8424
15162	-10,719	-16,649	12410	54,77	0,65858
15309	-6,531	-16,695	1111	57,37	0,665
12051	-4,328	-16,927	12409	59,046	0,54459
15309	-2,125	-16,927	12411	61,41	0,553
15309	-0,12	-16,927	12412	62,852	0,4915

Tabla 24—Posición de los nodos para la placa simulada sin mallado adaptativo. [2]

Placa Simulada					
Tramo $-66 < X < 0$			Tramo $0 < X < 66$		
Nodo	Coordenada en x (mm)	Desplazamiento en z (mm)	Nodo	Coordenada en x (mm)	Desplazamiento en z (mm)
27050	-64,85	1,43	25489	-0,16	-16,28
26710	-59,34	1,55	25519	4,00	-16,27
26835	-56,67	1,45	25549	8,12	-16,27
27017	-54,13	1,51	25579	12,17	-16,26
30353	-43,90	2,08	25639	19,91	-16,23
28607	-41,29	2,29	25669	23,56	-16,10
28916	-38,75	2,05	25699	26,84	-14,65
29279	-36,30	1,32	25729	28,93	-11,96
24949	-34,03	0,28	25759	29,52	-8,61
25069	-33,80	0,14	25789	29,93	-5,65
25099	-33,13	-0,31	25819	30,74	-3,33
25129	-32,14	-1,25	25849	31,80	-1,70
25159	-30,95	-2,73	25879	32,75	-0,70
25189	-29,99	-4,97	24980	33,64	-0,01
25219	-29,54	-7,87	29583	35,99	1,11
25249	-28,86	-11,08	29220	38,18	1,61
25279	-27,05	-14,06	28579	40,43	1,94
25309	-23,97	-16,00	28006	44,99	1,71
25339	-20,30	-16,26	30804	50,20	1,34
25369	-16,48	-16,27	30718	52,69	1,38
25399	-12,52	-16,28	26785	54,64	1,44
25429	-8,46	-16,28	30157	58,46	1,40
25459	-4,33	-16,28	29924	63,83	1,32
25489	-0,16	-16,28	27886	65,37	1,30

Tabla 25–Posición en el eje Z de puntos de la placa en función de su coordenada X.

Placa Real			
Tramo $-66 < X < 0$		Tramo $0 < X < 66$	
Coordenada en x (mm)	Desplazamiento en z (mm)	Coordenada en x (mm)	Desplazamiento en z (mm)
-62,96	-3,7	1,51	-18,46
-60,38	-3,61	4,05	-18,46
-57,8	-3,66	6,59	-18,47
-55,26	-3,73	9,13	-18,49
-52,74	-3,8	11,67	-18,51
-50,22	-3,8	14,22	-18,54
-47,68	-3,78	16,76	-18,58
-45,16	-3,74	19,3	-18,63
-42,62	-3,66	21,8	-18,63
-40,09	-3,58	24,18	-18,42
-37,53	-3,47	26,38	-17,66
-34,81	-3,63	28,16	-16,26
-31,8	-4,91	29,24	-13,99
-30,68	-6,67	30,01	-11,65
-30,27	-9,71	30,36	-9,27
-29,9	-12,04	30,84	-6,41
-29,12	-14,34	34,19	-3,73
-28	-16,33	37,52	-3,39
-26,1	-17,73	40,1	-3,53
-23,8	-18,45	42,62	-3,62
-21,36	-18,64	45,16	-3,72
-18,84	-18,62	47,68	-3,79
-16,3	-18,58	50,21	-3,81
-13,75	-18,54	52,73	-3,81
-11,21	-18,51	55,25	-3,73
-8,67	-18,49	57,78	-3,64
-6,12	-18,47	60,36	-3,55
-3,58	-18,47	62,95	-3,62

Para resumir los datos de estas tres tablas, se calculan las profundidades de las placas con nodos determinados que nos dan la profundidad verdadera. En las tablas anteriores están resaltadas y son los nodos situados en los extremos de los tramos. Para la placa simulada los nodos utilizados se pueden ver en la siguiente figura.

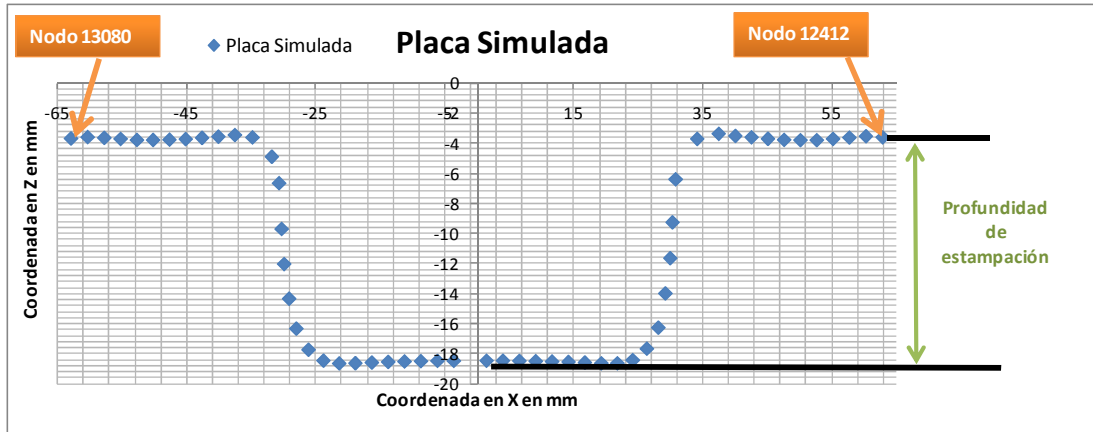


Figura 6.61– Puntos utilizados para calcular la profundidad de estampación.

Tabla 26–Profundidad de la estampación.

Profundidad de Estampación (mm)					
1º Tramo			2º Tramo		
Real	Simulado con mallado adaptativo	Simulado sin mallado adaptativo	Real	Simulado con mallado adaptativo	Simulado sin mallado adaptativo
17,27	17,609	17,71	17,44	17,4185	17,58

Con los datos de las dos tablas se puede hacer un pequeño gráfico para ver más o menos la forma que tiene. Debido a que los datos de los que se disponen son en la zona en la que el punzón realiza su función, no se dibuja el resto de la pieza. Realmente sólo nos interesa esa zona ya que es la que sufre el esfuerzo.

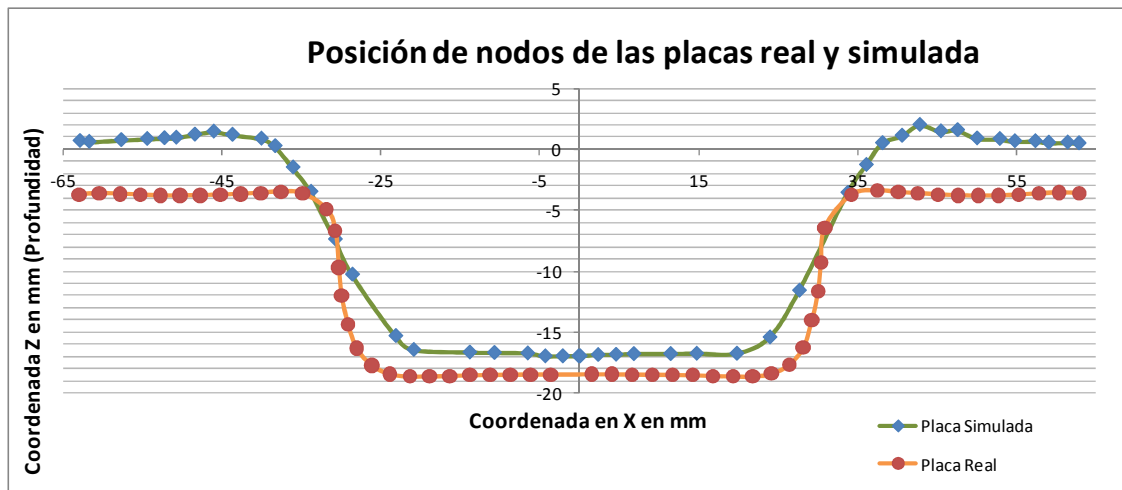


Figura 6.62– Posición de los nodos en las placas real y simulada.

6.2.8 Análisis de resultados

Después de haber expuesto todo el material que se ha visto de soluciones, se cree procedente realizar algunos análisis y conclusiones sobre los resultados.

La primera parte de resultados es la de los gráficos que crea LS-DYNA con la deformada y con el criterio de Von Misses.

- Los primeros son para ver cómo el programa va mallando en función de la necesidad. Se pueden ver los distintos grados de finura de mallado que va realizando el programa para ir obteniendo más precisión en los resultados. Las zonas en las que se crean más tensión y que más deformación sufren, el programa las malla con un grado superior para obtener resultados más óptimos. En proyectos anteriores [1] [2], lo que se hacía para solucionar esto, era mallar la placa con diferentes grados de finura. Esto ralentizaba el cálculo de soluciones. Se perdía mucho tiempo tanto el diseño como en el cálculo. En el diseño porque había que repetir las etapas hasta acertar con el grado de mallado. Y en el cálculo, porque el mallado fino se aplicaba a toda la pieza incluso en zonas que no las necesitaba, ya que el mallado fino se necesita sólo en las zonas que sufren mayores deformaciones y tensiones. De la forma en la que se ha hecho en este proyecto, se ahorra bastante tiempo.
- Los segundos gráficos son más a modo orientativo para poder ver la distribución de tensiones a lo largo del tiempo de la simulación. Cómo se sabía antes de hacer la simulación, la zona donde la pieza sufre más tensiones, es en la zona de penetración del punzón.
- Por último, se ha puesto la pieza final vista desde el lateral para observar el alabeo de la pieza y que se debe como se ha dicho, a que no se utilizaron todos los troqueles de las herramientas para realizar la simulación.

La parte siguiente es donde se pueden analizar los resultados de una forma más numérica y más exacta aunque esto nos sirve para comprobar que los resultados son factibles ya que la intención de este proyecto es explicar la funcionalidad del *mallado adaptativo*.

Cómo se dijo antes, la zona de penetración y parte de alrededor se dividió en dos tramos para situar los nodos y ver sus desplazamientos en el eje Z. Gracias a eso, se han creado las tablas donde se pueden sacar varias conclusiones:

- Las profundidades de embutición entre la placa real y la simulada con mallado adaptativo son prácticamente iguales. Se puede ver en la tabla 26 los resultados. La diferencia entre la real y la simulada para el tramo 1 es de 0,339mm. Para el tramo 2 la diferencia sería de 0,0215 mm por lo que se darían como bastantes aceptables los dos tramos. Se puede observar que las diferencias entre la real y la simulada sin mallado adaptativo son superiores

por lo que se puede concluir que los resultados son menos exactos y por lo tanto no guiaremos más por los que están hechos con mallado adaptativo.

- Se debe también observar las diferencias entre un tramo y otro. Tanto para la placa real y la simulada con mallado adaptativo, las diferencias de profundidad (0,13 y 0,190) entre los tramos son aceptables.
- Ahora, se debería comentar algo sobre los ángulos de los extremos de la placa. Se puede ver en la figura 6.58 que los ángulos respecto al eje X de la placa simulada, son diferentes que los de la placa real. Esto se debe al pequeño alabeo que se ha producido en la placa simulada.
- Para terminar se podría comentar que hay pequeñas diferencias entre el tramo 1 y 2 de la placa simulada y esto se debe a que no hay una simetría perfecta en la simulación. Son muy pequeñas esas diferencias por lo que no es necesario repetir la simulación.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1 Conclusiones

Durante todo el proyecto se ha intentando justificar todos los pasos que se han ido dando. Ahora es el momento sacar conclusiones generales de esas justificaciones y de algunas interpretaciones de resultados:

- Una vez más se ha podido ver la utilidad de usar programas AEF (análisis de elementos finitos) para desarrollar piezas. Ha quedado demostrado que el uso de este tipo de programas está a la cabeza de la lista de las cosas que hay que hacer a la hora de desarrollar cualquier pieza en el sector de la industria.
- El objetivo principal del proyecto era explicar el funcionamiento del Mallado Adaptativo. Se ha explicado este proceso a lo largo de todo el proyecto y se han ido ajustando todos los parámetros para sacar las soluciones utilizando este modo de cálculo. Este tipo de mallado lo que hace es ir afinándose en las zonas que sufren más deformaciones y tensiones. La utilización del Mallado Adaptativo ha sido un gran avance respecto a proyectos anteriores porque ha reducido el tiempo en gran medida. Este aspecto se expone más detalladamente a continuación.
- Otro objetivo bastante importante y que ya no sólo se buscaba en este proyecto sino que se busca en general en el sector de la industria, es el *ahorro de tiempo*. Este factor conlleva casi siempre un ahorro de costes por lo que hoy en día en la que la economía de escala está tan desarrollada, este ahorro tendría poder de decisión a la hora de fabricar una pieza. El ahorro de tiempo se ha conseguido principalmente de estas dos formas.
 - Reduciendo el tiempo de diseño. Los proyectos anteriores [1] [2] ponían un grado de mallado que se pensaba viable y se calculaban las soluciones. Si las soluciones no eran factibles debido al tamaño del mallado, se volvían a ajustar algunos parámetros y se volvía a calcular. Esto se repetía hasta que se llegaba a una solución viable. Pues bien, con el mallado adaptativo se ahorran los ajustes de parámetros ya que el mallado se va adaptando mientras calcula en función de la necesidad. Éste se va adaptando para tener más precisión zonas de más esfuerzos.
 - Reduciendo el tiempo de cálculo. Para ver esta reducción se han comparado los tiempos de un proyecto similar [2] con los tiempos de este proyecto. El tiempo total para el proyecto anterior fue de 119 horas (primera etapa, 47 horas y segunda etapa, 72 horas). En este proyecto, el tiempo total de cálculo ha sido de 10 horas. Se puede concluir que se ha reducido en más del 90 % el tiempo de cálculo. Como se ha dicho anteriormente, en proyectos de más envergadura, es un factor importantísimo para el ahorro de costes.

- La factibilidad de los resultados que han salido, demuestra que LS-DYNA es un buen programa de elementos finitos. Se han comprobado los datos reales con los datos simulados y se ha visto la viabilidad de los resultados. La placa simulada es muy parecida a la real por lo que se puede confiar en los resultados aportados por el programa.
- Como se visto en el proyecto, cuando se utiliza Mallado Adaptativo no se puede utilizar la opción de Full Restart. Esta opción, se utilizaba para reiniciar la resolución conservando los resultados (tensiones y deformaciones) de la etapa anterior. En este proyecto se intentó primeramente hacerlo de ese modo pero después de acudir al manual [3] y leer que no se podía, se decidió realizar todo el proceso en una única simulación.

7.2 Conclusiones para trabajos guiar a trabajos futuros

Una vez terminado el proyecto, se ha pensado en todos los pequeños y simples matices que tiene éste pero que creaban problemas muy grandes. Ahora que el proyecto está terminado, se ve la necesidad de poner brevemente estos temas para trabajos futuros ya que si se hubiesen sabido desde el principio, tiempo de ejecución hubiese sido inferior.

- Si la definición de materiales se hace con orden lógico y mirando el resto del código, se puede suprimir el problema de crear componentes y de tener que crear las parts una a una.
- Cuando el mallado adaptativo es utilizado, al intentar ver los resultados gráficos, sólo se podrán ver las parts que se han seleccionado para que se mallen adaptativamente. Por lo tanto, se podría decir que los archivos .RSnn generados, sólo contienen resultados de estas parts.
- Los vectores de movimiento y fuerzas que se introducen por medio de array, se recomienda crearlos manualmente (sin ayuda de la interfaz) ya que es más fácil.
- Si las geometrías no están malladas, se pueden mover atravesándose unas con otras sin tener ningún efecto. Si no están malladas, son sólo geometrías.
- Durante la simulación, si no se define contacto de unas parts con otras, pueden también atravesarse sin tener efecto sobre la solución. Asimismo, cuando se definen los contactos, hay una opción para el instante de tiempo en que se quiere que empiece y termine el efecto de ese contacto.
- Se recomienda ver las todas la parts juntas. Hay una opción en LS-DYNA para que se muestren todas cada una con un color diferente.

- Una vez terminado el diseño del código, se recomienda deseleccionar la pieza que va a sufrir las deformaciones y darle a calcular. El tiempo de cálculo será muy pequeño en los resultados se podrá ver si se han programado bien los desplazamientos de herramientas y utillajes.
- Las herramientas y utillajes que tengan alguna curvatura, se recomienda darle un mallado más fino y ya que no se deforman, influiría muy poco sobre el tiempo de cálculo.
- Antes de ver los resultados gráficamente, se recomienda ajustar la escala porque puede que en la pantalla se resultados que no se parezcan a lo que debe salir, pero en la realidad, los resultados numéricos, esté bien.

7.3 Trabajos futuros

Ya que se ha resuelto todo el proyecto y que se ha visto su funcionalidad también se quiere dar ideas para posibles trabajos que pueden surgir a partir de éstos:

- Como este proyecto parte de otros [1] [2] en los que hay más etapas, se podría continuar aplicando mallado adaptativo para el resto de etapas.
- Se pueden considerar otros tipos de materiales ya que la tecnología de fabricación va desarrollándose muy rápido y van surgiendo materiales cada vez más ligeros proporcionando las mismas características.
- Este proyecto está desarrollado con unos parámetros de mallado determinados, pero éstos, se podrían ajustar de diferente forma para ver resultados específicos.
- Esta opción de mallado adaptativo se podría hacer para cualquier otro tipo de proceso de fabricación. Hoy en día, hay infinitos procesos por lo que se podría hacer con otras piezas y otros troqueles.

Capítulo 8

Análisis de Costes

8. Análisis de Costes

Este proyecto tan sólo conlleva cálculos técnicos y no contempla ejecución de ensayos o fabricación de componentes, por lo que el análisis de costes va a ser muy simple. A continuación se van poner los gastos que se tendrían en un proyecto de este tipo.

- Licencia de LS-DYNA: 53.480 euros.
- Salario del ingeniero junior: 20.53 euros / hora.
- Equipo para realizar simulaciones: 1.200 euros.

Con estos datos, se crea una tabla donde viene reflejado el presupuesto total para realizar este proyecto.

Concepto	Cantidad	Precio (euros)	Coste (euros)
Licencia LS-DYNA	1	53.480	53.480
Equipo (ordenador portátil)	1	1.200	1.200
Total			54.680
Concepto	Salario (euros /hora)	Horas trabajadas	Coste (euros)
Salario ingeniero junior	20.53	450	9.238,5
Total			9.238,5
Presupuesto Total (euros)			63.918,5

REFERENCIAS.:

- [1] “Simulación de un proceso de embutición mediante LS-DYNA”, Marcos Sánchez del Cura/ Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [2] “Simulación de un proceso de embutición mediante ANSYS LS-DYNA”, Natalia García Gayol/ Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [3] ANSYS Release 9.0 Documentation.
- [4] ANSYS LS-DYNA User’s guide (version 9.0), publicado en 2004
- [5] LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore software Technology Corporation, Mayo 1998.
- [6] “Apuntes de Tecnología de Fabricación”, Manuel Estrems Amestoy / Universidad Politécnica de Cartagena.
- [7] “Introducción al programa ANSYS”, Juan José del Coz Díaz y Francisco José Domínguez / E.T.S.I Ingenieros Industriales- Gijón
- [8] “Extrusión”, Fabio Steve Morales / Universidad San Carlos de Guatemala.
- [9] “Plegado de chapa con un punzón y una matriz”, Carlos Molinero / Director técnico de MECOS. Publicado en interempresas.net (1/04/2005). Accedido Mayo de 2010
- [10] http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_tracci%C3%B3n. Accedido en mayo de 2010.
- [11] “Embutición”, José Luis Montalvo / Instituto Superior Tecnológico “República Federal de Alemania”, Perú. Publicado en www.monografias.com. Accedido en mayo de 2010.
- [13] Apuntes de la asignatura Tecnología Mecánica”, departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, curso 2006-2007
- [14] “Simulación de un proceso de embutición mediante ANSYS/LS-DYNA”, Universidad Carlos III de Madrid, Juan Francisco Muñoz Díaz, 2007.
- [15] <http://www.dynaexamples.com/intro-by-j.-day/adaptive/adaptive-i>. Accedido en enero de 2010.
- [16] <http://www.youtube.com/watch?v=Rt-Mcvv1LG4>. Accedido en enero de 2010.